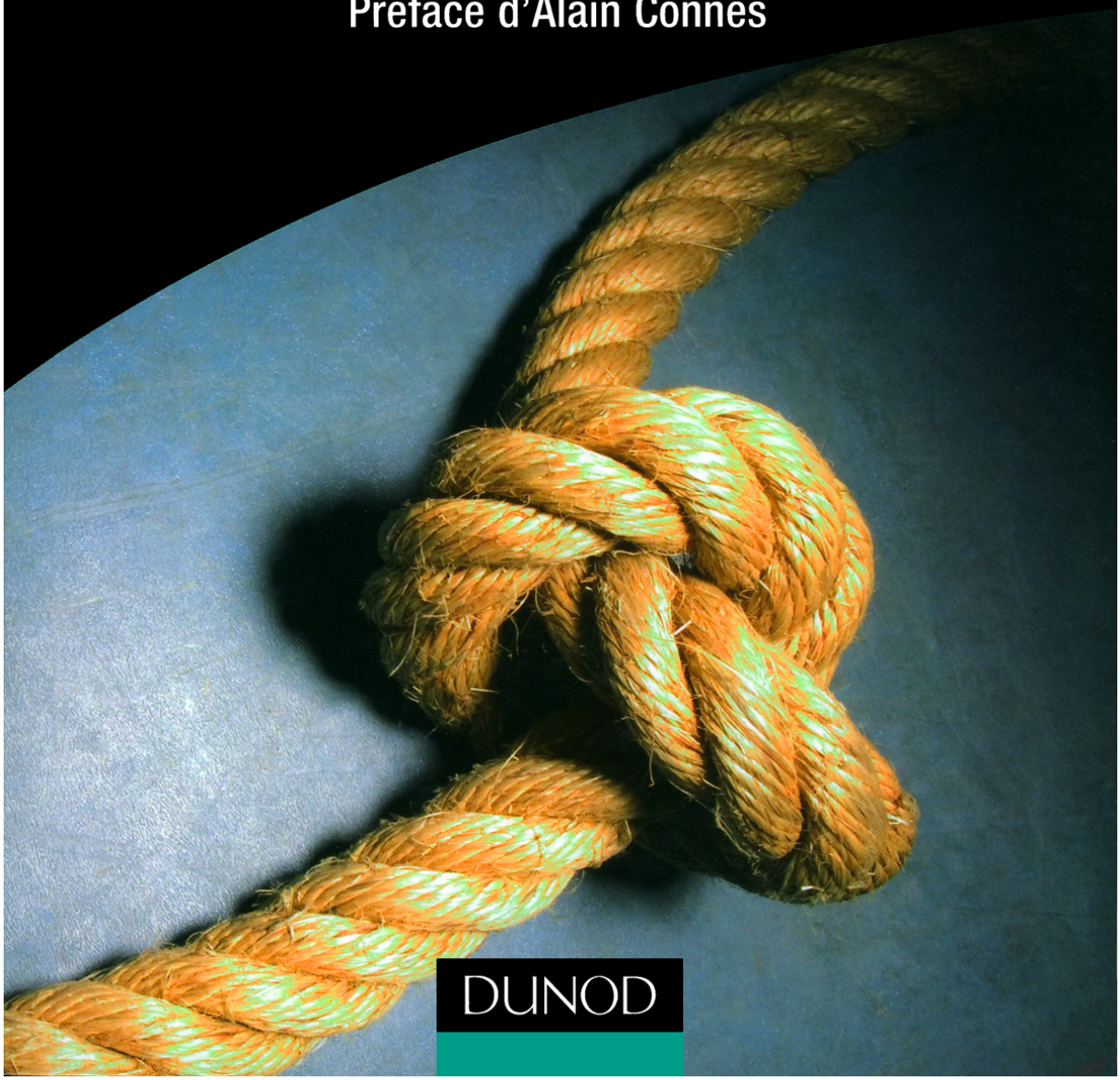
Lee Smolin

Quai des SCIENCES

RIEN NE VA PLUS EN PHYSIQUE !

L'échec de la théorie des cordes

Préface d'Alain Connes



DUNOD

Table des matières

Préface à l'édition française 4

Introduction 6

Partie I

La révolution inachevée

1. Cinq grands problèmes de la physique théorique 22

2. Le mythe de la beauté 34

3. Le monde comme géométrie 51

4. L'unification devient science 64

5. De l'unification à la superunification 74

6. Gravité quantique : la bifurcation 85

Partie II

Une brève histoire de la théorie des cordes

7. Préparations pour une révolution 102

8. La première révolution des supercordes 113

9. La révolution numéro deux 126

10. Une théorie de Tout ce qu'on veut 143

11. La solution anthropique 153

12. Ce que la théorie des cordes explique 166

Partie III

Au-delà de la théorie des cordes

13. Les surprises du monde réel 186

14. Construire sur Einstein 203

15. La physique après la théorie des cordes 215

Partie IV

Apprendre de l'expérience

16. Comment combattre la sociologie ?..... 234

17. Qu'est-ce que la science ?..... 257

18. Les visionnaires et les artisans..... 272

19. Comment fonctionne la science en réalité 291

20. Ce que nous pouvons faire pour la science 305

Remerciements 311

Notes 314

Préface à l'édition française

La théorie des cordes est une tentative de rendre compte de la physique des interactions fondamentales lorsqu'on ne peut plus négliger les phénomènes quantiques dans le traitement de la force de gravitation. L'idée de départ, qui ne manque pas de charme, provient d'une théorie avortée des interactions fortes recyclée sous la forme d'une théorie de toutes les forces de la physique. Elle consiste à interpréter les équations d'Einstein de la gravitation pure, dans un espace géométrique donné, comme autorisant la quantification du mouvement dans cet espace d'objets de dimension un (les cordes). L'apparition naturelle de groupes de Lie dans la théorie des cordes, jugés nécessaires par les physiciens des particules pour l'unification des forces électromagnétiques faible et forte, ainsi par exemple que l'annulation naturelle des anomalies, ont conduit nombre de physiciens théoriciens à pressentir dans cette théorie un candidat sérieux à l'unification des deux théories majeures : la gravitation et la théorie quantique. Depuis maintenant vingt-cinq ans, cette théorie a focalisé l'attention des théoriciens des hautes énergies et de nombreux mathématiciens. L'interaction avec l'analyse et la géométrie complexe, présente dès le début dans les travaux de pionniers comme Veneziano, et les résultats profonds de la théorie des champs conformes en dimension deux d'espace-temps ont alimenté pendant une longue période une relation extrêmement fructueuse entre mathématiques pures et idées physiques.

On ne peut qu'applaudir à un tel succès.

Soit, *so where is the trouble ?* Le problème, remarquablement analysé dans ce livre de Lee Smolin ; provient du déphasage de plus en plus perceptible entre les espoirs sans doute démesurés suscités par les premiers succès de la théorie sur le plan mathématique et leur portée physique réelle, malaise amplifié (involontairement sans doute) par une médiatisation sans retenue, articles de journaux, livres et programmes de télévision présentant comme des vérités ce qui ne sont encore que des idées n'ayant reçu aucun assentiment de la nature.

Un exemple concret : la physique des particules est modélisée de nos jours par le modèle standard, une merveille de subtilité qui résulte du dialogue constant entre théorie et expérience au cours du XX^{e} siècle. Que disent les ouvrages de vulgarisation ou les articles de journaux ? Que la théorie des cordes rend compte non seulement du modèle standard, mais également de ses interactions avec la gravitation. Ayant travaillé longtemps sur ce modèle, j'ai voulu en avoir le cœur net et me suis rendu au mois de juin 2006 à une conférence de théorie des cordes, à Cargese. J'ai assisté aux discours des plus grands spécia-

listes du sujet et quelle ne fut pas ma stupéfaction de voir que, même après avoir mijoté des dizaines de recettes de cuisine pour fabriquer la variété de Calabi-Yau adéquate, la réponse qu'ils obtenaient ressemblait très peu au modèle standard (techniquement, par exemple : un doublet de Higgs par génération).

Il y a là un réel problème, car la science n'avance pas sans confrontation avec la réalité. Il est parfaitement normal et souhaitable de laisser du temps à une théorie en gestation pour se développer sans pression extérieure. Il n'est par contre pas normal qu'une théorie ait acquis le monopole de la physique théorique sans jamais la moindre confrontation avec la nature et les résultats expérimentaux. Il n'est pas sain que ce monopole prive de jeunes chercheurs de la possibilité de choisir d'autres voies, et que certains des leaders de la théorie des cordes soient à ce point assurés de la domination sociologique qu'ils puissent dire : « Si une autre théorie réussit là où nous avons échoué, nous l'appellerons théorie des cordes. »

Le livre de Lee Smolin est une analyse lucide de cet état de fait. J'ai appris beaucoup en le lisant, aussi bien sur la physique, merveilleusement racontée, que sur les qualités humaines de Lee Smolin, son amour de la physique et de l'originalité mêlée à la persévérance, qui sont les conditions nécessaires pour apporter une petite pierre à l'édifice que l'esprit humain construit afin de comprendre où nous avons bien pu provisoirement atterrir.

Alain Connes
Mathématicien, médaille Fields 1982
Octobre 2006

Introduction

Dieu pourrait être ou ne pas être. Ou les dieux. Pourtant, il y a quelque chose qui nous ennoblit dans notre quête du divin. Quelque chose d'humanisant, dans chacun des pas qui mènent les hommes vers la recherche d'une vérité plus profonde. Certains cherchent la transcendance dans la méditation ou la prière ; d'autres la cherchent dans le service qu'ils rendent à leurs proches ; d'autres encore, qui ont la chance de posséder un talent particulier, cherchent la transcendance dans la pratique artistique.

La science est un chemin alternatif pour qui veut se consacrer aux questions les plus difficiles que pose la vie. Il n'est pas vrai que tout chercheur recherche la transcendance ; la plupart ne la recherchent pas. Mais, en chaque domaine, il existe des chercheurs, peu nombreux, dont la quête scientifique est mue par le désir de connaître les vérités les plus fondamentales de leur discipline. S'il s'agit des mathématiciens, ceux-ci veulent alors savoir ce que sont les nombres ou quel genre de vérité décrivent les mathématiques. S'il s'agit des biologistes, ceux-ci se demandent ce qu'est la vie et comment elle a commencé. Et s'il s'agit des physiciens, ils s'interrogent sur le temps et l'espace et sur ce qui a donné naissance au monde. Ces questions fondamentales sont les plus difficiles à résoudre, et il est rare qu'elles soient abordées de façon directe. Très peu de chercheurs ont la patience indispensable à la poursuite de ce questionnement. Ce métier est un des plus risqués, mais aussi celui qui donne, finalement, la plus grande satisfaction : lorsque le chercheur trouve une réponse à une question qui porte sur les fondements mêmes d'un domaine de recherche, cette nouvelle réponse, à elle seule, est capable de modifier l'ensemble de la connaissance humaine.

La mission des scientifiques est d'approvisionner notre fond commun de connaissances ; c'est pourquoi ils passent leurs vies à se confronter à des choses qu'ils ne comprennent pas. Et les chercheurs qui travaillent sur les fondements d'un domaine de connaissance ont la lucidité de reconnaître que les blocs fondamentaux sur lesquels repose toute leur construction ne sont jamais aussi solides que ce que croient habituellement leurs collègues.

Ce livre est l'histoire d'une quête pour comprendre la nature à son niveau le plus profond. Les héros de cette histoire sont les chercheurs qui travaillent à étendre les connaissances des lois les plus fondamentales de la physique. Il se trouve que la période où se déroule cette histoire – depuis 1975 environ – est aussi la période où j'ai poursuivi ma propre carrière professionnelle de physicien théoricien. Il se peut que cette époque soit la pé-

riode la plus étrange et la plus frustrante de toute l'histoire de la physique, depuis l'époque où, il y a quatre cents ans, Kepler et Galilée ont donné vie et forme à la physique moderne.

Certains liront l'histoire que je vais raconter comme une tragédie. Pour être franc – et révéler le secret du fil conducteur de ce livre – nous avons échoué. Nous avons hérité d'une science physique qui progressait si rapidement qu'elle a souvent été considérée comme un modèle de la façon dont se pratique une discipline scientifique. Pendant plus de deux siècles et jusqu'à l'époque dont il est question ici, notre connaissance des lois de la nature a avancé très vite. Et pourtant aujourd'hui, malgré tous nos efforts, ce dont nous sommes certains n'excède pas ce que nous savions dans les années 1970.

Dans quelle mesure est-ce inhabituel que trente ans passent sans que des progrès considérables en physique fondamentale soient réalisés ? Même si nous regardons derrière nous, bien avant les deux siècles qui nous ont précédés, à l'époque où la science n'intéressait presque personne sauf quelques riches amateurs, la situation actuelle est sans précédent. Depuis au moins la fin du XVIII^{e} siècle, tous les vingt-cinq ans, des percées importantes sur des questions cruciales de physique ont été enregistrées.

En 1780, quand les expériences de chimie quantitative d'Antoine Lavoisier ont démontré la conservation de la matière, les lois du mouvement et de la gravité de Newton étaient connues depuis déjà presque cent ans. Pourtant, bien que Newton nous ait donné un cadre général permettant de comprendre toutes les lois de la nature, les frontières de ce cadre étaient largement ouvertes. L'humanité n'avait que commencé à apprendre les notions essentielles concernant la matière, la lumière et la chaleur ; et nous n'étions qu'au tout début de la compréhension des phénomènes mystérieux de l'électricité et du magnétisme.

Le quart de siècle suivant vit l'apparition de découvertes majeures dans chacun de ces domaines. Nous avons commencé à comprendre que la lumière est une onde. Nous avons découvert la loi qui régit la force entre les particules portant une charge électrique. La théorie de l'atome de John Dalton nous a permis de faire un grand pas en avant dans la compréhension de la matière. La notion d'énergie a été introduite ; l'interférence et la diffraction ont été expliquées par la théorie ondulatoire de la lumière ; la résistance électrique et la relation entre l'électricité et le magnétisme ont été étudiées.

Quelques concepts de base sous-jacents à la physique moderne ont vu le jour au cours du quart de siècle suivant, entre 1830 et 1855. Michael Faraday a introduit la notion de champs, moteur des forces. L'utilisation de cette notion lui a permis de faire de grands progrès dans la compréhension de l'électricité et du magnétisme. Pendant la même période, la loi de conservation d'énergie et le second principe de la thermodynamique ont été énoncés.

Vingt-cinq ans plus tard, en développant la théorie moderne de l'électromagnétisme, James Clerk Maxwell a mis au point les idées pionnières de Faraday concernant les champs. Non seulement Maxwell a unifié l'électricité et le magnétisme, mais il a aussi expliqué la lumière en tant qu'onde électromagnétique. En 1867, il est parvenu à expliquer le comportement des gaz en termes de théorie atomique. À la même époque, Rudolf Clausius a introduit la notion d'entropie.

La période entre 1880 et 1905 a vu les découvertes des électrons et des rayons X. Le rayonnement thermique a été étudié en quelques étapes, menant à la découverte par Max Planck, en 1900, de la formule qui décrit les propriétés thermiques du rayonnement ; c'est cette même formule qui déclenchera la révolution quantique.

En 1905, Albert Einstein avait vingt-six ans. Il avait échoué dans sa recherche d'un poste scientifique, pourtant son travail sur la physique de radiation du rayonnement thermique serait par la suite considéré comme une contribution majeure à la connaissance scientifique. Mais ce travail n'était pour lui qu'un échauffement. Il s'attaqua bientôt aux questions fondamentales de la physique : tout d'abord, comment peut-on réconcilier la relativité du mouvement avec les lois de l'électricité et du magnétisme de Maxwell ? Einstein a répondu avec sa théorie de la relativité restreinte. Doit-on penser aux éléments chimiques comme aux atomes newtoniens ? Einstein a prouvé que oui. Comment peut-on réconcilier les théories de la lumière avec l'existence des atomes ? Einstein nous a expliqué comment, et a démontré que la lumière est à la fois une onde et une particule. Et tout ceci au cours de l'année 1905, pendant les courts moments volés à son activité principale d'inspecteur des brevets.

L'élaboration des détails des grands résultats einsteiniens a occupé le quart de siècle suivant. En 1930, nous possédions déjà sa théorie de la relativité générale, qui contient l'idée révolutionnaire que la géométrie de l'espace n'est pas fixe, mais évolue dans le temps. La dualité onde-particule, découverte par Einstein en 1905, est devenue une théorie quantique complètement développée, qui a permis la compréhension détaillée des atomes, de la chimie, de la matière et de la radiation. En 1930 également, nous savions déjà que l'Univers contenait un grand nombre de galaxies semblables à la nôtre et nous savions qu'elles s'éloignaient les unes des autres. Les conséquences n'en étaient pas encore claires, mais nous savions quand même que nous vivions dans un univers en expansion.

Avec l'établissement de la théorie quantique et de la théorie de la relativité générale en tant qu'éléments fondamentaux de notre façon d'appréhender le monde, la première étape de la révolution physique du XX^{e} siècle était achevée. De nombreux professeurs de physique, qui étaient mal à l'aise avec toutes ces révolutions dans leur domaine d'expertise, étaient soulagés de pouvoir enfin revenir à une science normale, sans être obligés, à chaque fois, de remettre en question les hypothèses de base. Mais leur soulagement était bien prématuré.

Einstein est mort à la fin du quart de siècle qui a suivi, en 1955. Dans la même année, nous avions déjà appris comment assembler de manière cohérente la théorie quantique et la théorie de la relativité restreinte ; tel a été la grande contribution de Freeman Dyson et de Richard Feynman. Nous avions découvert le neutron, le neutrino et des centaines d'autres particules apparemment élémentaires. Nous avions également compris que les myriades de phénomènes naturels sont régies seulement par quatre forces : l'électromagnétisme, la gravité, les interactions nucléaires fortes (qui tiennent ensemble les noyaux atomiques) et les interactions nucléaires faibles (responsables de la désintégration radioactive).

Un autre quart de siècle nous conduit jusqu'en 1980. À cette date, nous avions élaboré la théorie expliquant les résultats de toutes les expériences menées jusqu'à ce jour avec les particules élémentaires ; à cette théorie, on a donné le nom de « modèle standard de la physique des particules élémentaires ». Pour prendre un exemple, le modèle standard a prédit, avec précision, la manière dont les protons et les neutrons sont constitués de quarks, et que ces derniers se tiennent ensemble grâce aux gluons, c'est-à-dire grâce aux porteurs des interactions nucléaires fortes. Pour la première fois dans l'histoire de la physique fondamentale, la théorie a rattrapé l'expérimentation. Depuis, personne n'a réalisé une expérience qui ne soit pas compatible avec le modèle standard ou avec la relativité générale.

Sur le chemin menant de l'infiniment petit à l'infiniment grand, notre connaissance de la physique s'étend aujourd'hui à la nouvelle science de la cosmologie, dont la théorie du Big Bang est devenue un point consensuel. Nous avons compris que notre Univers contient non seulement les étoiles et les galaxies, mais aussi des objets exotiques tels que les étoiles à neutrons, les quasars, les supernovae et les trous noirs. En 1980, Stephen Hawking avait déjà fait l'extraordinaire prédiction que les trous noirs émettent des radiations. Les astronomes détenaient également les preuves factuelles que l'Univers contient beaucoup de matière noire, c'est-à-dire une matière présente sous une forme qui n'émet ni ne reflète de lumière.

En 1981, le cosmologue Alan Guth a proposé un scénario concernant le tout début de l'histoire de l'Univers, qu'on a appelé « inflation ». Brièvement, l'inflation est une théorie selon laquelle l'Univers, très tôt dans son histoire, est passé par une phase d'extraordinaire expansion. Ceci explique pourquoi l'Univers semble être à peu près le même quelle que soit la direction dans laquelle on l'observe. La théorie inflationnaire a fourni des prédictions qui ont d'abord paru douteuses, jusqu'à ce que, il y a environ dix ans, les faits expérimentaux commencent à aller dans son sens. Au moment où j'écris ce livre, quelques énigmes subsistent encore, mais l'essentiel des preuves factuelles est en faveur de cette théorie.

C'est ainsi qu'en 1981, la physique pouvait se réjouir de deux cents ans de croissance explosive. Chacune des découvertes, suivie d'une autre et encore d'une autre, a approfondi notre compréhension de la nature, puisque, dans chaque cas, la théorie et l'expérience se sont enrichies mutuellement. Les idées nouvelles ont été testées et confirmées, et on a toujours pu donner une explication théorique aux découvertes expérimentales nouvelles. Et puis, au début des années 1980, tout s'est arrêté.

J'appartiens à la première génération de physiciens formés depuis que le modèle standard a été établi et accepté. Quand je rencontre mes vieux amis, de collège ou d'université, nous nous demandons parfois : « Qu'avons-nous découvert, notre génération, dont nous pourrions être fiers ? » Et si l'on considère que cette question porte sur les nouvelles découvertes fondamentales, confirmées par l'expérimentation et expliquées par la théorie – bref, sur des découvertes de l'ampleur de celles dont je viens de parler, – alors, nous sommes obligés de l'admettre, la réponse est : « Rien ! » Mark Wise est l'un des théoriciens de premier plan qui travaillent sur la physique des particules au-delà du modèle standard.

Lors d'un séminaire récent au Perimeter Institute for Theoretical Physics à Waterloo dans la province canadienne d'Ontario où je travaille, il a évoqué la question de l'origine de la masse des particules élémentaires. « Nous n'avons aucun succès dans la recherche d'une solution », a-t-il dit. « Si aujourd'hui j'avais un exposé à faire sur le problème de la masse des fermions, il est bien probable que je n'aurais parlé que de choses dont je pouvais déjà parler dans les années 1980[1]. » Mark Wise nous a raconté ensuite l'histoire suivante : avec John Preskill, un autre théoricien de premier plan, il est arrivé à Caltech en 1983 pour rejoindre le corps des professeurs de cette université. « John Preskill et moi-même étions assis dans son bureau en train de discuter... Vous voyez, c'était à Caltech que se trouvaient les dieux de la physique, et voilà que nous nous y trouvions nous-mêmes ! John a dit : "Je n'oublierai pas ce sur quoi il est important de travailler." Il s'est donc rappelé tout ce que nous savions de la masse des quarks et des leptons et il l'a écrit sur une feuille jaune qu'il a accrochée au-dessus de son bureau... pour ne pas oublier de travailler sur ce sujet. Quinze ans plus tard, je suis revenu dans son bureau. Nous étions à nouveau en train de discuter de quelque chose, et j'ai jeté un regard sur cette feuille jaune. Elle était toujours là, mais le soleil avait effacé tout ce qui y était écrit. Donc, les problèmes avaient disparu ! »

Il faut néanmoins admettre que deux découvertes expérimentales ont été faites ces dernières décennies : d'une part les neutrinos ont une masse et d'autre part l'univers est dominé par la mystérieuse matière noire et semble être en expansion accélérée. Mais nous n'avons aucune idée de la *cause* de la masse des neutrinos (ou de toute autre particule) et nous ne savons pas expliquer son apparition. Quant à la matière noire, elle ne s'explique avec aucune des théories physiques existantes. Sa découverte ne peut donc pas être considérée comme une réussite, puisqu'elle suggère qu'il existe un fait majeur qui nous échappe. Et excepté la matière noire, aucune particule nouvelle n'a été découverte, aucune nouvelle force n'a été trouvée, aucun phénomène nouveau n'a été rencontré que nous ne connaissions et n'appréhendions déjà il y a vingt-cinq ans.

Comprenez-moi bien. Certes, depuis vingt-cinq ans, nous sommes très occupés. Un énorme progrès a été fait dans l'application de théories établies concernant des sujets divers : les propriétés des matériaux, la physique moléculaire sous-jacente à la biologie ou encore la dynamique des grands amas d'étoiles. Mais là où il s'agit d'étendre notre connaissance des lois de la nature, nous n'avons pas véritablement avancé. De nombreuses belles idées ont été explorées, des expériences remarquables ont été réalisées avec les accélérateurs de particules, des observations ont été faites en cosmologie : mais, majoritairement, elles ont toutes servi à confirmer la théorie existante. Il y a eu peu d'avancées et, parmi elles, aucune dont l'importance et la portée soient comparables à celles faites au cours des deux siècles précédents. Quand quelque chose de ce genre se produit dans le monde des affaires ou du sport, on dit simplement qu'on se cogne la tête contre le mur.

Pourquoi la physique s'est-elle soudainement trouvée confrontée à des problèmes ? Que pouvons-nous faire à ce sujet ? Ce sont deux questions centrales de mon livre.

De nature, je suis optimiste. Pendant longtemps, je me suis battu contre la conclusion que, concernant la physique, notre époque – celle de ma propre carrière – est restée en

jachère. Pour moi, comme pour beaucoup de mes amis entrés sur la scène scientifique avec l'espoir d'apporter des contributions majeures à ce qui était à l'époque un domaine très dynamique, une certitude s'impose qui nous choque : contrairement à toutes les générations antérieures, nous n'avons fait aucune découverte dont nous pourrions être sûrs qu'elle nous survivra. Ce constat a engendré des crises personnelles. Mais, plus important, il a conduit à une crise de la physique elle-même.

Le défi principal de la physique théorique ces trois dernières décennies a été d'expliquer en profondeur le modèle standard. Sur ce sujet, il y a eu beaucoup d'activité. Des théories nouvelles ont été proposées et explorées, parfois avec un grand luxe de détails, mais aucune d'elles n'a été confirmée expérimentalement. Et c'est bien là que se trouve le cœur du problème : en science, pour qu'on croie à une théorie, elle doit fournir une prédiction nouvelle, différente de celles des théories antérieures, concernant une expérience non encore réalisée. Afin que cette expérience ait un sens, on doit être en position de pouvoir obtenir une réponse contredisant la prédiction. Quand les choses se passent ainsi, on dit que la théorie est *falsifiable*, c'est-à-dire qu'on peut la réfuter. La théorie doit également être *vérifiable* : il faut qu'on puisse vérifier la prédiction nouvelle, qui n'est faite que par la théorie considérée. Ce n'est que lorsqu'une théorie a passé ces tests et que les résultats de ces tests sont en accord avec les prédictions qu'elle est promue dans l'ordre des théories vraies.

La crise actuelle en physique des particules a pour origine le fait que l'on peut classer les théories qui sont allées au-delà du modèle standard, au cours des trente dernières années, en deux catégories. Certaines étaient falsifiables et ont été falsifiées. D'autres restent non testées, soit parce qu'elles ne produisent aucune prédiction compréhensible, soit parce que les prédictions qu'elles font ne peuvent pas être vérifiées à l'aide de techniques existantes.

Au cours des trois dernières décennies, les théoriciens ont proposé au moins une douzaine d'approches nouvelles. Chacune a été motivée par une hypothèse qui paraissait plausible, mais aucune n'a finalement eu de succès. Dans le domaine de la physique des particules, parmi ces approches nouvelles, se trouvent la technicouleur, les modèles de préons et la supersymétrie. Dans le domaine des théories de l'espace-temps, on trouve la théorie des twisteurs, les ensembles causaux, la supergravité, les triangulations dynamiques et la gravitation quantique à boucles. Quelques-unes de ces théories se révèlent aussi exotiques que leurs noms le suggèrent.

Une théorie particulière a attiré l'attention plus que toutes les autres : il s'agit de la théorie des cordes. Les raisons de sa popularité ne sont pas difficiles à comprendre. Elle prétend expliquer correctement à la fois le très grand et le très petit : la gravité et les particules élémentaires – et pour atteindre ce but, elle fait l'hypothèse la plus audacieuse de toutes les théories : elle postule que le monde contient des dimensions non encore observées et beaucoup plus de particules que nous n'en connaissons aujourd'hui. En même temps, la théorie des cordes affirme que toutes les particules élémentaires apparaissent comme les vibrations d'une seule entité, une corde, qui obéit à des lois simples et élégantes. La théorie des cordes se présente comme la seule théorie qui unifie *toutes* les particules et *toutes* les forces de la nature. En cette qualité, elle promet des prédictions compréhensibles et uni-

voques pour toutes les expériences déjà réalisées ou non encore réalisées. Beaucoup d'efforts ont été consentis pour valider la théorie des cordes au cours des vingt dernières années, mais nous ne savons toujours pas si elle est vraie ou pas. Malgré de nombreux travaux, la théorie n'a pas fait pas de prédictions nouvelles qui seraient vérifiables par une expérience réalisable aujourd'hui, ou même par une expérience que l'on pourrait concevoir à terme. Ses quelques prédictions compréhensibles ont déjà été faites par d'autres théories déjà acceptées.

Une partie des raisons pour lesquelles la théorie des cordes ne produit pas de prédictions nouvelles, est qu'elle se décline elle-même dans un nombre infini de versions. Même si nous posons comme contrainte de ne considérer que les théories qui s'accordent aux faits expérimentaux fondamentaux concernant notre univers, tels que sa taille et l'existence de l'énergie noire, il nous reste encore au moins 10^{500} théories des cordes différentes, c'est-à-dire un nombre où 1 est suivi de 500 zéros, davantage que le nombre d'atomes existant dans la partie connue de l'univers. Avec un nombre de théories aussi grand, il n'y a que très peu d'espoir que nous puissions identifier le résultat d'une expérience qui ne serait pas explicable par l'une de ces théories. Ainsi, quel que soit le résultat expérimental, la théorie des cordes ne pourra jamais être réfutée. Mais l'inverse est également vrai : aucune expérience ne pourra, non plus, démontrer que la théorie des cordes est vraie.

De même, nous ne comprenons que très peu de choses à la plupart de ces théories, tandis que les quelques théories que nous comprenons en détail contredisent toutes les données expérimentales existantes, en général d'au moins deux façons différentes. On se trouve donc devant un paradoxe. Les théories des cordes que l'on sait étudier sont fausses. Les théories des cordes que l'on ne sait pas étudier existent en un nombre tellement grand qu'aucune expérience concevable ne pourra jamais les contredire toutes.

Ceci n'est qu'une partie de nos problèmes. La théorie des cordes repose sur quelques conjectures fondamentales, pour lesquelles nous avons quelques indications expérimentales, mais pas de preuves. Pire même, après tout le travail scientifique consacré au développement de la théorie des cordes, nous ne savons toujours pas s'il existe une théorie complète et cohérente, à laquelle on pourrait donner le nom de « théorie des cordes ». Ce que nous avons, en fait, n'est pas une théorie mais une large collection de calculs approximatifs, qui s'accompagnent de tout un réseau de conjectures, qui, si elles sont vraies, tendent vers l'existence d'une théorie. Mais jamais cette théorie n'a été couchée sur papier. Nous ne savons pas quels sont ses principes fondamentaux. Nous ne savons pas dans quel langage mathématique elle s'exprimera ; ce sera peut-être un langage nouveau que nous devrons inventer. Vu cette absence de principes fondamentaux et de formulation mathématique, nous ne pouvons même pas dire que l'on sait ce qu'affirme la théorie des cordes.

Voici comment en parle le théoricien des cordes Brian Greene dans son dernier livre, *The Fabric of Cosmos* :

> Même aujourd'hui, plus de trois décennies après son articulation initiale, la plupart des praticiens des cordes croient que nous n'avons toujours pas de réponse compréhensible à une question rudimentaire : Qu'est-ce que la théorie des cordes ? La majorité des chercheurs sentent qu'il manque à la formulation actuelle de la théorie des cordes une

> espèce de principe fondamental que nous trouvons au cœur des autres avancées majeures[2].

Gerard t'Hooft, prix Nobel pour son travail en physique des particules élémentaires, a ainsi défini l'état de la théorie des cordes :

> En fait, je ne serais même pas prêt à appeler la théorie des cordes une *théorie*, mais je dirais plutôt un *modèle* ; ou même pas cela : juste un *pressentiment*. Après tout, une théorie doit inclure les instructions sur la façon d'identifier les choses qu'on souhaite décrire, dans le cas de la physique des particules qui est le nôtre, on doit, au moins en principe, pouvoir formuler les règles pour calculer les propriétés de ces particules et pouvoir dire comment on obtient des nouvelles prédictions les concernant. Imaginez que je vous donne une chaise tout en vous expliquant que les pieds lui manquent et que le siège, le dos et l'accoudoir seront peut-être bientôt livrés. Quelle que soit cette chose que je vous ai donnée, est-ce que je peux toujours l'appeler une chaise[3] ?

David Gross, prix Nobel pour son travail sur le modèle standard, est devenu l'un des champions les plus combatifs de la théorie des cordes. Pourtant lui aussi a clôturé un colloque récent dont l'intention était de célébrer le progrès de la théorie, en disant ceci :

> Nous ne savons pas de quoi nous parlons... L'état de la physique aujourd'hui est le même qu'à l'époque où les scientifiques étaient mystifiés par la radioactivité. Il leur manquait quelque chose d'absolument fondamental. Il nous manque peut-être, à nous, quelque chose d'aussi profond qu'à eux à cette époque-là[4].

Bien que la théorie des cordes soit si incomplète que son existence même n'a que le statut d'une conjecture non démontrée, ce n'est guère un obstacle pour ceux, bien nombreux, qui travaillent sur cette théorie, et qui croient qu'elle est la seule voie d'avancement possible en physique théorique. Il y a quelque temps, un éminent théoricien des cordes nommé Joseph Polchinski, qui travaille à l'Institut Kavli de physique théorique de l'Université de Californie à Santa Barbara, a été invité à donner une conférence intitulée *Les Alternatives à la théorie des cordes*. Sa première réaction lorsqu'il reçut l'invitation fut de dire : « Que c'est idiot, il n'existe aucune alternative à la théorie des cordes. Toutes les bonnes idées en font parties[5]. » Lubos Motl, un professeur assistant à Harvard, a récemment écrit sur son blog que « la raison la plus probable pour laquelle personne n'a convaincu les autres de la possibilité d'une alternative à la théorie des cordes, est qu'il n'existe pas d'alternatives[6] ».

Qu'est-il en train de se passer ? Généralement, dans le discours scientifique, le terme « théorie » signifie quelque chose de précis. Lisa Randall, théoricienne des particules bien connue et collègue de Motl à Harvard, définit la théorie comme « un cadre physique bien défini dans un ensemble de présupposés fondamentaux à propos du monde – un cadre économe, qui inclut une large variété de phénomènes. La théorie fournit un ensemble bien précis d'équations et de prédictions – celles qui sont corroborées par les résultats expérimentaux[7] ».

La théorie des cordes ne correspond pas à cette description, du moins, pas encore. Comment se fait-il donc que les experts soient sûrs qu'il n'existe pas d'alternative à cette

théorie, s'ils ne savent pas exactement ce qu'elle est ? Qu'y a-t-il de spécial dans ce cas, qui les autorise à affirmer qu'il n'existe pas d'alternative ? Ce sont quelques-unes des questions qui m'ont amené à écrire ce livre.

La physique théorique est compliquée. Très compliquée. Non parce qu'elle requiert l'utilisation d'un certain formalisme mathématique, mais parce qu'elle prend de grands risques. Nous verrons à plusieurs reprises, au cours de notre examen de l'histoire de la physique contemporaine, qu'une telle science ne peut pas se faire sans risque. Si un grand nombre de chercheurs ont travaillé pendant plusieurs années sur un problème particulier et s'ils ne trouvent pas de réponse, cela peut signifier que la réponse n'est ni facile ni évidente. Cela pourrait aussi signifier que la question n'a pas de réponse.

Dans la mesure où elle est comprise, la théorie des cordes affirme que le monde est en réalité fondamentalement différent du monde que nous connaissons. Si la théorie des cordes est correcte, alors le monde a plus de dimensions et beaucoup plus de particules et de forces que nous n'en avons observées jusqu'à aujourd'hui. La plupart des théoriciens des cordes écrivent et parlent comme si l'existence de ces dimensions et de ces particules supplémentaires était un fait assuré, dont aucun bon scientifique ne peut douter. Il est arrivé plus d'une fois qu'un théoricien des cordes me dise : « Mais veux-tu vraiment dire qu'il est à ton avis possible que les dimensions supplémentaires *n'existent pas* ? » En fait, ni la théorie ni l'expérimentation ne fournissent de preuve de l'existence de ces dimensions supplémentaires. L'un des objectifs de ce livre est précisément de démystifier les affirmations de la théorie des cordes. Ses idées sont élégantes et bien motivées, mais pour comprendre pourquoi elles n'ont pas véritablement permis de progresser, nous devons être très clairs dans l'analyse de ce que la théorie des cordes démontre réellement et de ce qui lui manque.

Puisque la théorie des cordes est une aventure à hauts risques – qui n'a aucun soutien expérimental, mais beaucoup de très généreux soutiens de la part de la communauté scientifique –, il n'y a que deux fins possibles à cette histoire. Si l'on démontre que la théorie des cordes est correcte, les théoriciens des cordes deviendront alors les plus grands héros de l'histoire des sciences. À partir d'un petit nombre d'intuitions initiales, dont toutes permettent des lectures ambiguës, ils auront découvert que la réalité est beaucoup plus vaste qu'on ne l'imaginait. Colomb a découvert un nouveau continent, jusque-là inconnu du roi et de la reine d'Espagne (tout comme la noblesse espagnole était inconnue des résidents du Nouveau Monde). Galilée a découvert quelques étoiles et quelques lunes, et les astronomes ont par la suite découvert des planètes nouvelles. Tout cela ferait pourtant bien pâle figure devant la découverte de ces dimensions nouvelles. De plus, beaucoup de théoriciens des cordes croient que les myriades de mondes, décrits par les nombreuses théories des cordes, existent réellement, de même que d'autres univers que nous ne pouvons pas observer directement. S'ils ont raison, cela veut dire que nous connaissons aussi peu la réalité du monde qu'un groupe d'hommes des cavernes ne connaissait la Terre. Personne dans l'histoire de l'humanité n'a jamais prédit correctement une expansion aussi large du monde connu.

D'un autre côté, si les théoriciens des cordes ont tort, il est alors impossible qu'ils aient tort juste un peu. Si les dimensions et les symétries nouvelles n'existent pas, on comptera la théorie des cordes parmi les plus grands échecs de la science, comparables aux échecs de ceux qui continuèrent à travailler sur les épicycles de Ptolémée quand Kepler et Galilée avaient déjà dépassé cette théorie. Les théoriciens des cordes ne pourront plus alors que nous raconter une histoire édifiante sur ce qu'il ne faut pas faire en science, comment il ne faut pas permettre à une conjecture théorique de nous emmener si loin, au-delà les limites de la connaissance rationnelle, au risque de commencer à s'engager sur des voies fantaisistes.

Un des résultats de l'ascension de la théorie des cordes est que la communauté des scientifiques qui travaillent en physique théorique est divisée. Beaucoup d'entre eux continuent de travailler sur la théorie des cordes, et une cinquantaine de thèses de doctorat sont soutenues chaque année dans ce domaine. Mais il y a aussi des physiciens profondément sceptiques, qui n'ont jamais vu l'intérêt de poursuivre ces recherches, ou qui ont déjà renoncé à attendre un signe que la théorie pourrait avoir une formulation cohérente ou pourrait faire une prédiction expérimentale réelle. Le désaccord n'est pas toujours amical. Des doutes sont exprimés de chaque côté sur la compétence professionnelle et le sens éthique de chacun. Il est vraiment difficile de préserver des relations confraternelles entre ces deux groupes.

Selon l'image que nous avons tous de la science, des situations comme celles-ci ne devraient pas survenir. L'intérêt même de la science contemporaine réside – ainsi qu'on nous l'a appris à l'école – dans l'existence d'une méthode débouchant sur une meilleure compréhension de la nature. Les désaccords et les controverses sont certainement nécessaires pour que la science avance, mais on présuppose toujours un moyen de résoudre toute discussion par l'expérimentation pratique ou l'utilisation appropriée des mathématiques. Cependant, dans le cas de la théorie des cordes, ce moyen ne semble plus fonctionner. Partisans et adversaires de la théorie des cordes sont tellement sûrs de la validité de leurs points de vue respectifs qu'il est difficile d'avoir avec eux une discussion cordiale sur la question, même s'ils sont amis. « Comment est-il possible que tu ne vois pas la beauté de la théorie ? Comment est-il possible qu'une théorie puisse expliquer tout cela et pourtant ne pas être vraie ? » Ainsi s'expriment les théoriciens des cordes. Ce qui provoque une réponse aussi échauffée de la part des sceptiques : « Avez-vous perdu la raison ? Comment pouvez-vous croire si fortement en une théorie en l'absence totale de tests expérimentaux ? Avez-vous oublié comment est censée fonctionner la science ? Comment pouvez-vous être sûrs d'avoir raison, lorsque vous ne savez même pas ce qu'est cette théorie ? »

J'écris ce livre dans l'espoir qu'il contribuera à une discussion honnête et utile à la fois entre experts et parmi le grand public. Malgré ce que j'ai vu ces dernières années, je crois en la science. Je crois en la capacité de la communauté scientifique de dépasser l'acrimonie et de résoudre la controverse à l'aide d'arguments rationnels, fondés sur des affirmations démontrables. Je suis conscient du fait que, en soulevant ces problèmes, je fâcherai quelques-uns de mes amis et collègues qui travaillent sur la théorie des cordes. Je ne peux qu'insister sur le fait que j'écris ce livre, non pas pour attaquer la théorie des cordes ou

ceux qui y croient, mais par admiration pour eux tous et, par-dessus tout, comme une expression de ma confiance en la communauté scientifique des physiciens.

Ce n'est donc pas un livre de « nous » contre « eux ». Durant ma carrière, j'ai travaillé sur la théorie des cordes et sur d'autres approches de la gravité quantique (une théorie qui réconcilie la théorie générale de la relativité d'Einstein avec la théorie quantique). Même si la plupart de mes efforts ont été consacrés à ces autres approches, j'ai été, à certaines époques de ma vie, un fervent adepte de la théorie des cordes et je passais mon temps à essayer de résoudre ces problèmes essentiels. Je ne les ai pas résolus ; mais j'ai écrit dix-huit articles sur le sujet. Par conséquent, les erreurs dont il sera question dans ce livre sont les miennes autant que celles des autres. Je parlerai des conjectures qu'on a crues vraies sans en avoir la moindre preuve. Mais je faisais aussi partie des croyants et j'ai fait des choix dans mes recherches, fondés sur mes croyances.

J'évoquerai les pressions que subissent les jeunes chercheurs, qui les poussent à poursuivre leur recherche sur les sujets sanctionnés par le courant scientifique dominant, afin d'avoir une carrière décente. J'ai moi-même ressenti ces pressions, et il fut une époque où je les ai laissées guider ma carrière. J'ai moi-même ressenti ce conflit entre le besoin de bâtir mes propres jugements scientifiques de façon indépendante et la nécessité de ne pas m'aliéner pour autant ce courant dominant. J'écris ce livre non pour critiquer les scientifiques qui ont fait des choix différents des miens, mais pour analyser pourquoi les scientifiques doivent se confronter à ces choix.

J'ai d'ailleurs mis longtemps à me décider à écrire ce livre car, personnellement, je n'aime pas le conflit et la confrontation. Après tout, dans le genre de recherche que nous menons, ce qui vaut la peine constitue toujours un risque, et tout ce qui compte vraiment est ce que nos étudiants penseront nécessaire d'enseigner à leurs propres étudiants dans cinquante ans. Pendant longtemps, j'ai nourri l'espoir que quelqu'un, dans un centre de recherche sur la théorie des cordes, écrirait une critique objective et détaillée de ce qui est, et n'est pas, achevé par la théorie. Cela ne s'est pas produit.

Une des raisons de rendre public ces problèmes tient au débat qui a eu lieu, il y a quelques années, entre scientifiques et « constructivistes sociaux » – c'est-à-dire un groupe de professeurs en sciences sociales –, au sujet de la manière dont fonctionne la science. Les constructivistes sociaux disaient que la communauté scientifique n'était pas plus rationnelle ni plus objective que n'importe quelle autre communauté humaine. Cela ne correspondait absolument pas à la façon dont la majorité des scientifiques percevaient leur discipline. En effet, on apprend aux étudiants que la croyance en une théorie scientifique doit toujours être fondée sur une évaluation objective des preuves. Nos opposants dans ce débat répondent que nos propres affirmations sur la manière dont fonctionne la science ne sont que propagande pour intimider les gens et acquérir du pouvoir. Ils affirment que toute entreprise scientifique est motivée par les mêmes forces politiques et sociales qui dominent d'autres domaines d'activité.

L'un des arguments majeurs que nous, scientifiques, avons utilisé dans ce débat, était que notre communauté est différente des autres, parce qu'elle se gouverne selon des normes élevées, qui l'empêchent d'accepter une théorie avant qu'elle ne soit prouvée par des

calculs publiés et des données expérimentales – et ceci au-delà des doutes émis par un expert compétent. Comme je l'expliquerai en détail ci-dessous, ce n'est pas toujours le cas en théorie des cordes. Malgré l'absence de soutiens expérimentaux et de formulation précise, certains partisans de cette théorie la croient vraie ; leur certitude semble plus émotionnelle que rationnelle.

Grâce à une campagne de promotion agressive, la théorie des cordes est désormais considérée comme la voie royale d'exploration des grandes questions de la physique. Presque chaque théoricien des particules qui occupe un poste permanent au très prestigieux Institute for Advanced Study, y compris le directeur, est un théoricien des cordes ; la seule exception est une personne qui a obtenu son poste il y a plusieurs dizaines d'années. La même chose est vraie en ce qui concerne l'Institut Kavli de physique théorique. Huit des neuf lauréats des bourses McArthur attribuées aux physiciens des particules depuis le début du programme en 1981 étaient des théoriciens des cordes. Et dans les départements de physiques des plus grandes universités américaines (Berkeley, Caltech, Harvard, MIT, Princeton, Stanford), parmi les vingt-deux professeurs ayant un poste permanent en physique des particules qui ont soutenu leurs thèses de doctorat après 1981, vingt ont acquis leur réputation en travaillant sur la théorie des cordes ou en faisant de la recherche dans les disciplines adjacentes.

La position dominante qu'occupe la théorie des cordes dans le monde académique a pris une telle ampleur qu'il n'est rien d'autre que suicidaire pour un jeune physicien théoricien de ne pas rejoindre ce domaine de recherche. Même dans les disciplines où la théorie des cordes ne fait pas de prédictions, comme la cosmologie ou la phénoménologie des particules, c'est un lieu commun qu'un chercheur commence un exposé ou un article en affirmant qu'il croit que l'on pourra dériver les résultats qu'il présente de la théorie des cordes, et ceci dans un avenir très proche.

Il existe de bonnes raisons de prendre la théorie des cordes au sérieux en tant qu'hypothèse sur la nature, mais cela ne revient pas à la déclarer vraie. J'ai passé moi-même quelques années à travailler sur la théorie des cordes parce que j'y croyais suffisamment pour vouloir résoudre ces problèmes essentiels. Je croyais aussi ne pas avoir le droit de me forger une opinion sans connaître la théorie en détail, et on ne peut la connaître vraiment que si on la pratique. Parallèlement, je travaillais sur d'autres approches aussi prometteuses que la théorie des cordes pour aborder les questions fondamentales. Ainsi, je suis maintenant considéré comme suspect des deux côtés à la fois. Certains théoriciens des cordes me croient « anti-corde ». On ne peut pas se tromper plus que cela. Je n'aurais jamais investi tant de temps et d'efforts à travailler sur la théorie des cordes et je n'aurais jamais écrit trois livres largement motivés par ses problèmes si je n'étais pas fasciné par cette théorie et si je n'avais pas le sentiment qu'elle pourrait un jour se révéler être une partie de la vérité. Je ne suis ni *pour* quelque chose, si ce n'est la science, ni *contre* quelque chose, excepté ce qui menace la science.

Toutefois, les enjeux dépassent la simple amitié entre collègues. Pour réussir notre travail, nous, physiciens, avons besoin de ressources importantes, en grande partie fournies par nos concitoyens grâce aux impôts et aux fonds d'investissements. En échange, ils nous

demandent seulement l'assurance que nous nous retournerons vers eux quand nous aurons avancé dans la connaissance du monde que nous partageons tous. Les physiciens qui communiquent avec le public – à travers des textes écrits, des conférences publiques, la télévision ou Internet – ont la responsabilité de raconter l'histoire de la physique sans tricher. Nous devons être attentifs à présenter nos échecs en même temps que nos réussites. En effet, plutôt que de nous causer du tort, être honnêtes sur nos échecs nous aidera dans nos recherches. Après tout, les concitoyens qui nous soutiennent vivent dans le réel. Ils savent que pour progresser, quelle que soit l'entreprise, il faut prendre des risques ; ils savent que parfois, on rate ce que l'on cherche.

Ces dernières années, de nombreux livres et articles de revues destinés au grand public ont présenté de formidables idées, sur lesquelles travaillent les physiciens théoriciens. Certains de ces écrits ont pris trop peu soin de décrire la distance qui sépare ces idées nouvelles des tests expérimentaux et des preuves mathématiques rigoureuses. Ayant moi-même bénéficié de ce désir du public de connaître le fonctionnement de l'univers, je tiens à m'assurer que tout, dans ce livre, reste au plus près des faits. Je souhaite présenter les différents problèmes que nous ne sommes pas capables de résoudre, expliquer clairement quelle expérimentation les appuie et laquelle les réfute, enfin bien distinguer les faits, la spéculation et la mode intellectuelle.

Nous, physiciens, avons une responsabilité quant à l'avenir de notre profession. La science, comme j'argumenterai plus tard, se fonde sur une éthique, et celle-ci requiert la bonne foi de la part de ceux qui la pratiquent. Elle demande également que chaque chercheur soit juge de ce en quoi il ou elle croit, de sorte que toute idée non encore prouvée soit soumise à une bonne dose de scepticisme et de critique jusqu'à ce qu'elle soit prouvée ou réfutée. Cela demande, en retour, que l'on maintienne la diversité des approches des problèmes irrésolus. Nous faisons de la recherche parce que même les plus doués d'entre nous ne connaissent pas les réponses. Souvent, ces réponses se trouvent dans une direction autre que celle poursuivie par le courant scientifique dominant. Dans ces situations, et même quand le courant dominant donne, lui aussi, la bonne réponse, le progrès scientifique dépend du soutien que nous apportons aux chercheurs qui ont des points de vue divergents.

La science nécessite un équilibre délicat entre le conformisme et la différence. Puisqu'il est si facile de se tromper, puisque les réponses sont inconnues, les experts – quel que soit leur degré d'intelligence ou d'entraînement – seront en désaccord sur le choix de l'approche qui a le plus de chances de produire un résultat. En conséquence, si la science doit avancer, la communauté scientifique doit s'appuyer sur la diversité des approches du problème en question.

De nombreux indices tendent à montrer que ces principes de base ne sont plus vérifiés en physique fondamentale. Alors que peu de gens sont ouvertement en désaccord avec les arguments qui soutiennent la nécessité de points de vue diversifiés, dans la réalité cela est de moins en moins vrai. Certains jeunes théoriciens des cordes m'ont dit qu'ils se sentaient contraints à ne travailler que sur la théorie des cordes, qu'ils y croient ou pas, parce que la théorie des cordes est perçue comme un billet d'entrée qui leur permettra d'obtenir

un poste de professeur dans une université. Ils ont raison : aux États-Unis, les théoriciens qui poursuivent des approches de physique fondamentale différentes de la théorie des cordes n'ont pratiquement aucune chance de réussir leurs carrières. Au cours des quinze dernières années, au total, trois professeurs adjoints qui travaillaient sur d'autres approches de la gravité quantique que la théorie des cordes obtinrent un poste dans une université américaine ; tous ces postes n'appartiennent qu'à un seul groupe de recherche. Alors que la théorie des cordes mène en ce moment même un combat sur le front scientifique, elle l'a déjà emporté sur le front académique.

Cela nuit à la science, parce que cela étouffe la recherche d'alternatives même si quelques-unes sont prometteuses. Malgré un investissement inadéquat dans ces approches, certaines parmi elles sont allées bien plus loin que la théorie des cordes dans la suggestion de prédictions de résultats concrets pour les expériences actuellement en cours.

Comment est-il possible que la théorie des cordes, développée par plus d'un millier des plus brillants chercheurs qui ont travaillé dans les meilleures conditions, soit maintenant sur le point de s'effondrer ? Pendant longtemps, cette question m'a troublé, mais je crois avoir la réponse aujourd'hui. Ce qui est sur le point de s'effondrer n'est pas vraiment une théorie particulière, c'est plutôt un style, une façon de pratiquer la science, adapté aux problèmes du milieu du XX^{e} siècle mais pas aux problèmes fondamentaux d'aujourd'hui. Le modèle standard de la physique des particules fut le triomphe d'une façon particulière de faire de la recherche, devenue dominante en physique dans les années 1940. Cette façon est pragmatique et demande qu'on garde la tête froide, car elle favorise la virtuosité du calcul plus que la réflexion sur des problèmes conceptuels difficiles. Cela est très différent de la manière dont Albert Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger et les autres révolutionnaires du début du XX^{e} siècle faisaient de la science. Leurs réussites venaient d'une réflexion approfondie sur les questions les plus fondamentales concernant l'espace, le temps et la matière. Ils considéraient ce qu'ils étaient en train de faire comme partie intégrante d'une tradition philosophique plus générale, avec laquelle ils se sentaient à l'aise.

Dans l'approche de la recherche en physique théorique développée et enseignée par Richard Feynman, Freeman Dyson et les autres, la réflexion sur les problèmes fondamentaux n'a pas sa place. Cet état de choses les a libérés de la nécessité de débattre du sens de la physique quantique – une activité à laquelle ne pouvaient pas échapper leurs aînés et qui a produit trente années de progrès spectaculaire. Cette situation est tout à fait justifiée : il nous faut des styles de recherche différents pour nous attaquer à des problèmes différents. Afin d'élaborer des applications au sein de cadres établis, il faut pratiquer des manières de penser différentes – et avoir des penseurs différents de ceux qui dédièrent leurs vies à l'invention de ces cadres.

Néanmoins, comme j'argumenterai en détail par la suite, la leçon que nous devons tirer de ces trente dernières années est que les problèmes d'aujourd'hui ne peuvent pas être résolus par une voie scientifique pragmatique. Pour poursuivre les avancées de la science, nous devons à nouveau nous confronter aux questions essentielles sur l'espace et le temps, la théorie quantique et la cosmologie. Nous avons à nouveau besoin de chercheurs qui

sauront inventer des solutions nouvelles pour élucider les problèmes fondamentaux. Comme on le verra plus loin, les directions dans lesquelles nous devons progresser – qui ramènent la théorie au contact direct de l'expérimentation – sont empruntées par des chercheurs qui ont plus de facilités à inventer de nouvelles idées qu'à suivre la mode scientifique. Ces chercheurs font leur travail dans le même esprit de recherche fondamentale que les pionniers de la physique du début du XX^{e} siècle.

J'insiste sur le fait que mon inquiétude ne s'applique pas aux théoriciens des cordes en tant que personnes, dont certains comptent aujourd'hui parmi les physiciens les plus talentueux et les plus accomplis que je connaisse. Je serais au premier rang pour défendre leur droit à continuer leur recherche de la façon qu'ils croient prometteuse. Mais je suis extrêmement inquiet de cette tendance qui veut qu'une seule direction de recherche obtienne tous les soutiens, tandis que les autres approches également prometteuses sont laissées sans le sous.

Cette tendance aura des conséquences tragiques si, comme j'argumenterai plus loin, la vérité appartient à une école de pensée qui demande un renouvellement radical de nos idées les plus fondamentales à propos de l'espace, du temps et du monde quantique.

I

La révolution inachevée

1

Cinq grands problèmes de la physique théorique

Dès l'origine de la science physique, il y eut des hommes qui crurent appartenir à la dernière génération pour laquelle l'inconnu existait encore. La physique a toujours semblé quasiment achevée à ceux qui l'ont pratiquée. Cette autosatisfaction n'a été battue en brèche qu'au moment des révolutions, lorsque des hommes honnêtes devaient admettre qu'ils ne connaissaient pas les choses les plus fondamentales. Mais même les révolutionnaires souscrivent toujours à cette grande idée, que le jour est proche où l'on en finira complètement avec la physique et que la quête du savoir sera achevée.

Nous vivons un de ces moments révolutionnaires ; et nous y sommes depuis déjà un siècle. L'époque révolutionnaire précédente a été celle de la révolution copernicienne, au début du XVI^e^ siècle, au cours de laquelle les théories aristotéliciennes de l'espace, du temps, du mouvement et de la cosmologie furent toutes écartées. Le point culminant de cette révolution était la proposition d'Isaac Newton, une nouvelle théorie physique, publiée en 1687 dans ses *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. La révolution actuelle a commencé en 1900 avec la découverte par Max Planck de la formule qui décrit la distribution d'énergie dans le spectre de la radiation thermique et qui eut pour conséquence de prouver que l'énergie n'est pas continue, mais quantifiée. Cette révolution doit encore arriver à sa conclusion. Les problèmes que les physiciens doivent résoudre aujourd'hui sont, en grande partie, des questions qui restent sans réponse, parce que la révolution scientifique du XX^e^ siècle reste inachevée.

Au cœur de notre échec à conclure la révolution scientifique actuelle se trouvent cinq problèmes, dont la solution nous échappe. Ces problèmes étaient déjà présents quand j'ai commencé mes études de physique dans les années 1970, et bien que nous ayons beaucoup appris à leur sujet au cours des trente dernières années, ils restent non résolus. D'une façon ou d'une autre, toute théorie de physique fondamentale doit résoudre ces cinq problèmes. Ainsi, il conviendra de les étudier, l'un après l'autre, de près.

Albert Einstein a sans doute été le physicien le plus important du XX^e^ siècle. Il est possible que sa plus grande réussite soit la découverte de la relativité générale, qui est à ce jour notre meilleure théorie de l'espace, du temps, du mouvement et de la gravitation. Sa profonde perspicacité nous a appris que la gravité et le mouvement sont dans une intime rela-

tion, non seulement entre eux mais également avec la géométrie de l'espace et du temps. Cette idée a marqué une fracture avec des siècles de réflexion sur l'espace et le temps, qui, avant Einstein, ont été pensés comme fixes et absolus. Considérés comme éternels et immuables, ils constituaient un fond permanent qu'on utilisait pour définir des notions comme la position et l'énergie.

Selon la théorie générale de la relativité d'Einstein, l'espace et le temps ne constituent plus un fond fixe et absolu. L'espace est aussi dynamique que la matière ; il bouge et il change de forme. En conséquence, l'univers entier peut grandir ou diminuer en taille, et le temps peut avoir un début (comme dans le Big Bang) ou une fin (comme dans un trou noir).

Einstein a également obtenu un autre résultat. Il a été le premier à reconnaître le besoin d'une nouvelle théorie de la matière et du rayonnement. En fait, la nécessité d'une rupture avec la physique précédente était déjà présente de façon implicite dans la formule de Planck, mais Planck lui-même n'avait pas pris toute la mesure des conséquences de sa formule. Il croyait qu'il serait possible de la réconcilier avec la physique newtonienne. Einstein ne partageait pas ce point de vue. En 1905, il a donné un premier argument en faveur d'une nouvelle théorie non newtonienne. Vingt ans plus tard, quand la théorie a enfin été inventée, celle-ci a reçu le nom de « théorie quantique ».

Ces deux découvertes, la relativité et le quantique, nous ont, chacune, demandé de rompre définitivement avec la physique de Newton. Pourtant, malgré ce très grand progrès accompli au cours du siècle dernier, ces deux découvertes restent incomplètes. Chacune d'elles possède des faiblesses et des défauts, qui tendent à prouver l'existence d'une théorie plus fondamentale. Mais la raison la plus évidente pour laquelle chacune des deux théories est incomplète est l'existence de l'autre.

Notre esprit nous incite à chercher une troisième théorie, qui unirait toute la physique, et la raison à l'origine de cette incitation est simple. Il est évident que la nature, elle, est « unifiée ». L'univers dans lequel nous nous trouvons est interconnecté, dans le sens où tout interagit avec tout le reste. Il ne peut pas y avoir de solution où nous aurions deux théories de la nature, qui décriraient des phénomènes différents, comme si l'une n'avait rien à voir avec l'autre. Toute prétendante au sacre de théorie ultime ne peut être qu'une théorie complète de la nature. Elle doit inclure l'ensemble de notre connaissance.

La physique a survécu pendant longtemps sans cette théorie unifiée, parce que, en ce qui concerne l'expérience, nous avons toujours été capables de diviser le monde en deux royaumes. Dans le royaume atomique, où règne la physique quantique, on peut le plus souvent ignorer la gravité. On peut traiter l'espace et le temps comme le faisait Newton : en tant qu'un fond invariant. L'autre royaume est celui de la gravitation et de la cosmologie. Dans ce monde, on peut souvent ignorer les phénomènes quantiques.

Mais cette division ne peut être qu'une solution provisoire. La dépasser est le premier grand problème non résolu de la physique théorique.

Ce problème s'appelle le « problème de la gravité quantique ».

Outre l'argument fondé sur l'unité de la nature, il existe des problèmes spécifiques à chaque théorie, qui demandent que cette théorie soit unifiée avec l'autre. Chacune se heurte aux infinis. Dans la nature, il nous reste encore à rencontrer quelque chose de mesurable qui aurait une valeur infinie. Mais en théorie quantique aussi bien qu'en relativité générale, on trouve des prédictions selon lesquelles certaines quantités physiquement significatives sont infinies. C'est la façon dont la nature punit les théoriciens impudents qui osent briser son unité.

La relativité générale a un problème avec les infinis, car, à l'intérieur d'un trou noir, la densité de la matière et la force du champ gravitationnel deviennent très rapidement infinies. Il semble que tel était aussi le cas très tôt dans l'histoire de l'Univers – du moins, si l'on peut faire confiance à la relativité générale pour décrire l'enfance de l'Univers. En un point de densité infinie, les équations de la relativité générale ne tiennent plus. Certains chercheurs interprètent cet effet comme un arrêt du temps, mais une opinion plus tempérée veut que la théorie soit simplement inadéquate. Pendant longtemps, les savants supposaient qu'elle était inadéquate parce que les effets de la physique quantique avaient été négligés.

La théorie quantique, elle aussi, génère des infinis. Ceux-ci surgissent lorsqu'on essaye d'utiliser la mécanique quantique pour décrire les champs, comme par exemple le champ électromagnétique. En effet, les champs électrique et magnétique ont des valeurs dans chaque point de l'espace. Cela signifie que l'on a affaire à un nombre infini de variables (même dans un volume fini il y a un nombre infini de points, d'où un nombre infini de variables). En théorie quantique, il existe des fluctuations non contrôlables des valeurs de chaque variable quantique. Avec un nombre infini de variables, dont les fluctuations sont non contrôlables, on peut obtenir des équations complètement ingérables et qui prédisent des valeurs infinies quand on leur pose des questions sur la probabilité que tel événement se produise, ou sur la valeur d'une force.

Voici donc un exemple supplémentaire où l'on s'aperçoit qu'une partie essentielle de la physique a été laissée de côté. Pendant assez longtemps, nous avons eu l'espoir que lorsque la gravité serait prise en compte, les fluctuations deviendraient gérables et toutes les variables n'auraient plus que des valeurs finies. Si les infinis sont les signes d'une unification à inventer, la théorie unifiée n'en aura plus aucun. Elle sera ce qu'on appelle une « théorie finitaire », c'est-à-dire une théorie qui à toute question fournit une réponse en termes de nombres observables et finis.

La mécanique quantique a connu un grand succès dans l'explication d'un grand nombre de phénomènes. Son domaine s'étend des rayonnements aux propriétés des transistors et de la physique des particules élémentaires à l'action des enzymes et d'autres grandes molécules, qui sont des briques élémentaires de la vie. Au cours du siècle dernier, ses prédic-

tions se sont montrées correctes à d'innombrables occasions. Cependant, certains physiciens ont toujours eu des problèmes avec la théorique quantique, parce que la réalité qu'elle décrit est fort étrange. La théorie quantique contient en son sein quelques paradoxes conceptuels qui sautent aux yeux et qui restent non résolus même quatre-vingts ans après sa création. Un électron est à la fois une onde et une particule. Même chose pour la lumière. De plus, la théorie ne donne que des prédictions statistiques du comportement subatomique. Notre capacité à faire mieux que cela se trouve limitée par le « principe d'incertitude », qui dit que la position de la particule et son impulsion ne peuvent pas être mesurées au même moment. La théorie ne produit que des probabilités. Une particule, par exemple l'électron dans un atome, peut se trouver partout jusqu'au moment où on la mesure ; sur le champ, notre observation détermine son état. Cela suggère que la théorie quantique ne raconte pas encore l'histoire dans son ensemble. En conséquence, malgré son succès, de nombreux experts sont convaincus que la théorie quantique cache quelque chose d'essentiel concernant la nature, quelque chose qu'il nous reste à apprendre.

L'un des problèmes qui embarrasse la théorie depuis ses origines est la relation entre la réalité et le formalisme. Les physiciens s'attendaient, comme à leur habitude, à ce que la science donne une description de la réalité qui serait la même si nous n'étions pas là pour l'observer. La physique doit être plus qu'un ensemble de formules qui prédisent ce que nous observerons expérimentalement ; elle doit nous fournir une description de ce qu'*est* la réalité. Nous ne sommes que les descendants accidentels d'un ancien primate, apparus très récemment dans l'histoire du monde. Il est impossible que la réalité dépende de notre expérience. Il est également impossible que le problème de l'absence d'observateur soit résolu en évoquant des civilisations extraterrestres, parce qu'il y a eu une époque où le monde existait déjà, mais *trop* chaud et dense pour qu'une intelligence organisée puisse y exister.

Les philosophes appellent ce point de vue « réalisme ». On peut le résumer ainsi : il doit exister un *m*onde *e*xtérieur, *i*ndépendant de *n*ous (ou MEIN, comme l'appelait mon premier professeur de philosophie). Il s'en suit que les termes utilisés par la science pour décrire la réalité ne peuvent pas inclure – de quelque façon que ce soit – ce que nous choisissons, nous, de mesurer ou de ne pas mesurer.

La mécanique quantique, au moins dans la forme sous laquelle elle a été initialement proposée, n'était pas à l'aise avec le réalisme, parce qu'elle présupposait une partition de la nature en deux parties. D'un côté se trouve le système à observer. Nous, les observateurs, sommes de l'autre côté. De notre côté, se trouvent aussi les instruments que nous utilisons pour préparer les expériences et faire les mesures et les horloges qui enregistrent les instants où les événements ont lieu. On peut décrire la théorie quantique comme un nouveau langage dans notre dialogue avec les systèmes que nous étudions à l'aide de nos instruments. Ce langage quantique contient des verbes, qui se réfèrent à nos préparations et à nos mesures, et des noms, qui se réfèrent à ce que nous observons à la suite de ces préparations. Il ne nous dit rien sur ce que serait le monde si nous en étions absents.

Dès la création de la théorie quantique, un débat a fait rage entre ceux qui acceptaient cette façon de faire de la science et ceux qui la rejetaient. Beaucoup parmi les fondateurs

de la physique quantique, y compris Albert Einstein, Erwin Schrödinger et Louis de Broglie, répugnaient à cette approche. C'étaient des réalistes. Quelle que soit l'efficacité de la théorie quantique, pour eux, elle est restée incomplète, parce qu'elle ne pouvait pas fournir une image de la réalité, en notre absence. De l'autre côté, se sont trouvés Niels Bohr, Werner Heisenberg et plusieurs autres. Au lieu d'en être scandalisés, ils ont accueilli à bras ouverts cette nouvelle façon de faire de la science.

Depuis, les réalistes ont marqué quelques points en mettant en évidence des incohérences dans la formulation actuelle de la théorie. Certaines de ces apparentes incohérences surgissent grâce au fait que, si elle est universelle, la théorie quantique doit également s'appliquer *à nous*. Les problèmes viennent alors de la division du monde, nécessaire pour donner un sens à la théorie quantique. En particulier, une difficulté consiste à savoir où l'on met la ligne de division, celle-ci étant dépendante de celui qui fait l'observation. Quand on mesure un atome, l'observateur et son instrument sont d'un côté de la ligne, et l'atome, de l'autre. Mais imaginez que vous regardiez cet observateur à l'aide d'une caméra vidéo installée dans un laboratoire. Vous pourriez alors considérer tout le laboratoire – y compris les instruments et l'observateur lui-même, aussi bien que les atomes avec lesquels il joue –, comme des constituants d'un seul système que vous êtes en train d'observer. De l'autre côté, il n'y aurait que vous.

Par conséquent, vous et l'observateur décrivez deux systèmes différents. Celui de l'observateur inclut uniquement l'atome. Le vôtre inclut l'observateur, l'atome et tout ce que l'observateur utilise pour l'étudier. L'action que l'observateur perçoit en tant que mesure, vous ne la voyez que comme une interaction entre deux systèmes physiques. Ainsi, même si l'on est d'accord sur le fait qu'il n'est guère gênant de compter les actions de l'observateur parmi les phénomènes que la théorie doit expliquer, celle-ci ne nous suffit pas, dans sa forme habituelle. Il est indispensable que la mécanique quantique soit élargie afin de permettre des descriptions différentes, en fonction de qui est l'observateur.

Toute cette thématique est connue sous le nom de « problème des fondements de la mécanique quantique ». C'est le deuxième grand problème de la physique contemporaine.

Problème 2 : Résoudre les problèmes des fondements de la mécanique quantique, soit en donnant un sens à la théorie telle qu'elle existe actuellement, soit en inventant à sa place une nouvelle théorie, qui, elle, aura un sens clair.

Il existe plusieurs façons d'aborder ce problème :

1. Trouver un langage sensé pour la théorie, qui pourrait résoudre tous les mystères comme ceux que je viens de mentionner, et qui incorporerait la partition du monde entre système et observateur en tant que propriété fondamentale de la théorie.
2. Trouver une nouvelle interprétation de la théorie, c'est-à-dire une nouvelle façon de lire les équations, qui serait réaliste, de sorte que la mesure et l'observation ne jouent plus aucun rôle dans la description de la réalité fondamentale.

3. Inventer une nouvelle théorie, qui offrirait une compréhension plus profonde de la nature que celle offerte par la mécanique quantique.

Ces trois possibilités sont actuellement étudiées par une poignée de chercheurs. Malheureusement, peu de physiciens travaillent sur ce sujet. Parfois, cet état de fait est pris pour une preuve que le problème est ou déjà résolu, ou sans importance. Ni l'une ni l'autre conclusions ne sont vraies. En réalité, c'est peut-être le problème le plus sérieux de la science. Il est simplement tellement difficile à résoudre que nous ne progressons que très lentement. J'admire profondément les physiciens qui travaillent sur ce problème, à la fois pour la pureté de leurs intentions et pour leur courage d'ignorer la mode et d'attaquer la question la plus difficile et la plus essentielle.

Malgré tous leurs efforts, le problème reste insoluble. Cela suggère que la question n'est pas seulement de trouver une nouvelle façon de penser la théorie quantique. Ceux qui ont initialement formulé la théorie n'étaient pas des réalistes. Ils ne croyaient pas que les êtres humains étaient capables de formuler une image vraie du monde tel qu'il existe indépendamment de nos actions et observations. Au contraire, ils défendaient un point de vue sur la science très différent, à savoir que celle-ci ne peut être qu'une extension du langage ordinaire que nous utilisons pour décrire aux autres nos observations et nos actions.

Du point de vue de la physique plus récente, cette position paraît nombriliste ; c'est le regard *a posteriori* d'une époque qui sait déjà que les connaissances ont progressé. Ceux qui continuent à défendre la mécanique quantique comme elle a été formulée et proposent d'en faire la nouvelle théorie du monde, le font sous la bannière du réalisme. Ils soutiennent qu'il est nécessaire de réinterpréter la théorie suivant un point de vue réaliste. Pourtant, bien qu'ils aient fait quelques propositions intéressantes allant dans cette direction, aucune n'est vraiment convaincante.

Il n'est pas impossible que le réalisme en tant que philosophie finisse par périr, mais cela me semble quand même peu probable. Après tout, c'est le réalisme qui sous-tend la plupart des recherches scientifiques. Pour la majorité d'entre nous, la croyance au MEIN et la possibilité de le connaître réellement nous motivent dans notre difficile travail pour devenir des scientifiques et contribuer à la compréhension ultime de la nature. Étant donné l'échec des réalistes à donner un sens à la théorie telle qu'elle a été formulée, il paraît de plus en plus probable que la seule option possible soit la troisième : découvrir une nouvelle théorie qui serait plus en accord avec une interprétation réaliste.

Je dois avouer que je suis un réaliste. Je me place du côté d'Einstein et des autres, qui croient que la mécanique quantique est une description incomplète de la réalité. Mais alors, où devons-nous chercher ce qui manque à la mécanique quantique ? Il m'a toujours semblé clair que la solution demandera bien plus qu'une compréhension plus approfondie de la mécanique quantique elle-même. Je crois que si le problème n'a pas été résolu après tous les efforts accomplis, c'est parce qu'il nous manque quelque chose d'essentiel, il nous manque un lien avec les autres problèmes de la physique. Celui de la mécanique quantique ne sera pas résolu indépendamment des autres ; au contraire, la réponse émergera,

probablement, au fur et à mesure de la progression dans la tentative plus générale d'unifier la physique.

Mais si tout ceci est vrai, cela marche dans les deux sens : nous ne pourrons résoudre les autres grands problèmes qu'à condition de trouver une alternative prometteuse à la mécanique quantique.

L'idée que la physique doit être unifiée a probablement motivé plus de travaux en physique que n'importe quelle autre. Mais il existe plusieurs façons différentes d'unifier la physique, et on doit faire attention à ne pas les confondre. Jusqu'à maintenant, nous discutions de l'unification par le biais d'une *loi unique*. Il est difficile d'imaginer que quelqu'un puisse ne pas accepter que ce soit un objectif nécessaire.

Il existe cependant d'autres façons d'unifier le monde. Einstein, qui réfléchissait beaucoup à ce sujet, avançait qu'il est nécessaire de distinguer deux types de théories : les théories de principe et les théories constructives. Une théorie de principe est celle qui pose un cadre, qui rend possible la description de la nature. Par définition, la théorie de principe doit être universelle : elle doit s'appliquer à tout, parce qu'elle pose le langage de base que nous utilisons pour parler de la nature. Il ne peut pas y avoir deux théories de principe qui s'appliqueraient à des domaines différents. Puisque le monde est unique et que tout interagit avec tout le reste, il ne peut y avoir qu'un seul langage pour décrire ces interactions. La théorie quantique et la relativité générale sont toutes les deux des théories de principe. Logiquement, elles doivent être unifiées.

Les autres types de théories, les théories constructives, décrivent un phénomène particulier en termes de modèles ou d'équations spécifiques[1]. La théorie du champ électromagnétique et la théorie de l'électron sont des théories constructives. De telles théories ne peuvent pas exister seules ; elles doivent faire partie d'un contexte commun, défini par une théorie de principe. Mais tant que la théorie de principe le permet, il peut y avoir des phénomènes qui obéissent à des lois différentes. Par exemple, le champ électromagnétique obéit à des lois différentes de celles qui gouvernent la supposée matière noire de la cosmologie (dont on pense qu'elle dépasse très largement en quantité la matière atomique ordinaire dans l'Univers). Ce que nous savons de la matière noire, c'est que, quoi qu'elle soit, elle est noire. Cela signifie qu'elle n'émet pas de lumière. Il est donc probable qu'elle n'interagisse pas avec le champ électromagnétique. Ainsi, deux théories différentes peuvent exister indépendamment l'une de l'autre.

Le point essentiel est que les lois de l'électromagnétisme ne dictent pas ce qui doit exister d'autre dans le monde. Il peut y avoir, ou pas, des quarks, des neutrinos ou de la matière noire. De façon analogue, les lois décrivant les deux forces qui agissent à l'intérieur du noyau atomique (interactions fortes et interactions faibles) n'impliquent pas nécessairement l'existence de la force électromagnétique. On peut facilement imaginer un monde avec l'électromagnétisme, mais sans les interactions nucléaires fortes, ou encore l'inverse. Autant qu'on le sache, aucune de ces possibilités n'est contradictoire.

Mais il est toujours possible de se demander si toutes les forces que nous observons dans la nature ne pourraient pas être des manifestations d'une seule force fondamentale. Il

semble ne pas y avoir d'argument qui démontrerait que tel *devrait* être le cas, mais cela reste toutefois une chose qui *pourrait* être vraie.

Le désir d'unifier les différentes forces a produit, au cours de l'histoire de la physique, quelques avancées importantes. En 1867, James Clerk Maxwell a unifié l'électricité et le magnétisme en une seule théorie et un siècle plus tard, les physiciens ont compris que le champ électromagnétique et le champ de propagation des interactions nucléaires faibles (c'est-à-dire de la force qui est responsable de la désintégration radioactive) pourraient être unifiés. Cette unification a vu le jour sous la forme de la « théorie électrofaible », dont les prédictions ont été à plusieurs reprises confirmées dans les expériences réalisées au cours des trente dernières années.

Toutefois, il reste deux forces fondamentales dans la nature (dont nous connaissons l'existence) qui échappent à l'unification avec les champs électromagnétique et faible. Ce sont la gravité et les interactions nucléaires fortes (qui tiennent ensemble les particules appelées quarks et qui sont ainsi responsables de la formation des protons et des neutrons constituant le noyau atomique). Ces quatre forces fondamentales peuvent-elles être unifiées ?

C'est notre troisième grand problème.

Problème 3 : Déterminer si des particules et des forces différentes peuvent être unifiées dans une seule théorie, qui les expliquerait toutes en tant que manifestations d'une seule entité fondamentale.

J'appellerai ce problème « problème d'unification des particules et des forces », pour le distinguer de l'unification des lois dont nous avons parlé plus haut.

Au premier regard, ce problème semble facile. La première proposition d'unification de la gravité avec l'électricité et le magnétisme a été faite en 1914 et depuis, beaucoup d'autres ont vu le jour. Toutes ces propositions fonctionnent bien tant qu'on oublie une chose, à savoir que la nature est décrite par la mécanique quantique. En effet, si on exclut la physique quantique, alors les théories unifiées sont faciles à inventer. Mais si on inclut la théorie quantique, le problème devient beaucoup, beaucoup plus difficile. Puisque la gravité est l'une des quatre forces fondamentales de la nature, on doit résoudre le problème de la gravité quantique (c'est-à-dire le problème numéro 1 : comment réconcilier la relativité générale et la théorie quantique) en même temps que le problème de l'unification.

Au cours du siècle dernier, notre description physique du monde est devenue radicalement plus simple. Pour autant que les particules soient concernées, il n'en existe que deux sortes : les quarks et les leptons. Les quarks sont les constituants des protons et des neutrons, ainsi que de nombreuses autres particules que nous avons découvertes et qui ressemblent aux protons et aux neutrons. La classe des leptons inclut toutes les particules qui ne sont pas faites de quarks, y compris les électrons et les neutrinos. Tout cela réuni, le monde que nous connaissons peut être expliqué par six types de quarks et six types de leptons, qui interagissent les uns avec les autres à travers les quatre forces (on dit aussi « qua-

tre interactions ») : la gravité, l'électromagnétisme et les interactions nucléaires faible et forte.

Douze particules et quatre forces nous suffisent pour tout décrire dans le monde connu. On comprend aussi très bien la physique de base, qui concerne ces particules et ces forces. Cette compréhension se traduit dans une théorie qui prend en compte toutes ces particules et toutes les forces, sauf la gravité. Elle s'appelle le « modèle standard » de la physique des particules élémentaires. Le modèle standard n'a pas de problème avec les infinis que j'ai mentionnés plus haut. Quoi que l'on veuille calculer dans la théorie, on peut le calculer et le résultat en sera un nombre fini. Plus de trente ans ont passé depuis la formulation du modèle standard ; plusieurs de ses prédictions ont été vérifiées expérimentalement ; dans chaque cas, la théorie a été confirmée.

Le modèle standard a été formulé au début des années 1970. Excepté pour la découverte de la masse des neutrinos, il n'a jamais nécessité d'amendements. Pourquoi la physique ne s'est-elle donc pas terminée en 1975 ? Que restait-il encore à faire ?

C'est que, malgré son efficacité, le modèle standard se trouve confronté à un grand problème : il contient une longue liste de constantes à ajuster. Lorsqu'on énonce les lois de la théorie, on doit spécifier les valeurs de ces constantes. Ces valeurs pourraient être n'importe lesquelles, car la théorie reste mathématiquement cohérente quelles que soient les valeurs choisies. Celles-ci spécifient les propriétés des particules. Certaines nous fournissent les masses des quarks et des leptons, tandis que d'autres donnent les intensités des forces. Nous n'avons aucune idée de l'origine de ces nombres ; tout ce que nous avons à faire, c'est de les déterminer au début des expériences et de les insérer ensuite dans la théorie. Si vous pensez au modèle standard comme à une calculatrice, les constantes seront des fonctions courtes que vous pourrez assigner à n'importe quelle touche chaque fois que vous utilisez la calculatrice.

Il existe environ vingt constantes de ce type, et la présence d'autant de paramètres libres dans ce que l'on suppose être la théorie fondamentale cause un grand embarras. Chacune des constantes représente un fait capital que nous ignorons : une cause ou un mécanisme physique responsable de la valeur observée de cette constante.

C'est notre quatrième grand problème.

Problème 4 : Expliquer comment sont choisies, dans la nature, les valeurs des constantes libres du modèle standard de la physique des particules.

On espère dévotement que la vraie théorie unifiée des particules et des forces donnera la réponse unique à cette question.

En 1900, William Thompson (Lord Kelvin), un éminent physicien britannique, a proclamé avec fracas la fin de la physique. Seuls subsistaient deux petits nuages à l'horizon. Ces « nuages » furent finalement les indices qui nous conduisirent à la théorie quantique et à la théorie de la relativité. Aujourd'hui, alors que nous célébrons l'intégration de tous les phénomènes connus dans le modèle standard plus la relativité générale, nous sommes

encore conscients de la présence de deux nouveaux nuages. Ce sont la matière noire et l'énergie noire.

Mis à part la question de sa relation avec le quantique, nous pensons très bien comprendre la gravité. On a démontré que les prédictions de la relativité générale correspondent aux observations faites avec une précision remarquable. Les observations dont il s'agit vont de la chute d'objets et de lumière sur la Terre, en passant par les détails du mouvement des planètes et de leurs lunes, jusqu'aux échelles des galaxies et des amas de galaxies. Des phénomènes jadis exotiques, tels que les lentilles gravitationnelles – c'est-à-dire l'effet produit par la courbure de l'espace en raison de la présence de matière –, sont maintenant si bien compris qu'on les utilise pour mesurer les distributions de masse dans les amas des galaxies.

Dans de nombreux cas – lorsque les vitesses sont petites comparées à celle de la lumière et que les masses ne sont pas trop compactes –, les lois de Newton de la gravité et du mouvement donnent une excellente approximation des prédictions de la relativité générale. On en déduit avec une certitude quasi absolue que ces lois devraient nous permettre de prédire comment le mouvement de telle étoile est influencé par la masse des autres étoiles et plus généralement par toute la matière contenue dans la galaxie. Mais non, elles ne le font pas. La loi de la gravitation de Newton stipule que l'accélération d'un objet qui tourne autour d'un autre objet est proportionnelle à la masse du corps autour duquel il tourne. Plus lourde est l'étoile, plus rapide sera le mouvement orbital de la planète. Si deux étoiles ont, chacune, une planète qui tourne autour d'elles, et si les planètes se trouvent à la même distance des étoiles, alors la planète qui tourne autour de l'étoile la plus massive tournera plus vite. Ainsi, si l'on sait quelle est la vitesse d'un corps qui tourne sur une orbite autour d'une étoile et si l'on connaît la distance entre ce corps et l'étoile, on peut mesurer la masse de l'étoile. La même chose se passe pour les étoiles qui tournent sur des orbites autour du centre de la galaxie ; en mesurant la vitesse orbitale des étoiles, on peut mesurer la distribution des masses dans cette galaxie.

Ces dernières années, les astronomes ont réalisé une expérience très simple, au cours de laquelle ils ont mesuré la distribution des masses dans une galaxie de deux façons différentes et ont comparé les résultats. Premièrement, les astronomes ont mesuré la masse en observant les vitesses orbitales des étoiles ; deuxièmement, ils ont fait une mesure plus directe de la masse en comptant les étoiles, le gaz et la poussière qu'ils voyaient dans la galaxie. L'idée qui motive cette comparaison de deux mesures est que chacune doit fournir à la fois la masse totale de la galaxie et l'information sur sa distribution. Étant donné la bonne connaissance que nous avons de la gravité, et sachant que toutes les formes connues de la matière reflètent la lumière, les deux méthodes devraient s'accorder l'une l'autre.

Or, elles ne sont pas d'accord. Les astronomes ont comparé les deux méthodes de mesure de la masse pour plus de cent galaxies différentes. Dans presque tous les cas, les deux mesures divergent, et la différence entre les valeurs est loin d'être petite, mais plutôt de l'ordre d'un facteur 10. De plus, l'erreur va toujours dans le même sens : on a toujours besoin de plus de masse pour expliquer le mouvement observé des étoiles que ce que l'on calcule par comptage direct de toutes les étoiles, du gaz et de la poussière.

Il n'y a que deux explications possibles de cette divergence. Soit la seconde méthode échoue, parce qu'il y a beaucoup plus de masse dans les galaxies que nous ne le voyons, soit la loi de la gravité de Newton échoue, parce qu'elle ne prédit pas correctement le mouvement des étoiles dans le champ gravitationnel de leurs galaxies.

Toutes les formes de matière que nous connaissons reflètent la lumière, soit directement – comme la lumière des étoiles –, soit indirectement, comme celle reflétée par les planètes, les rochers interstellaires, le gaz ou la poussière. S'il existe une matière que nous ne voyons pas, elle doit donc se trouver dans un état et sous une forme nouvelle, qui ni n'émet, ni ne reflète la lumière. Et puisque la divergence des résultats est aussi grande, la majorité de la matière au sein des galaxies doit exister sous cette nouvelle forme.

Aujourd'hui, la plupart des astronomes et des physiciens pensent qu'ils tiennent là le dénouement du mystère en question. Il nous manque de la matière ; elle est là, mais nous ne la voyons pas. On appelle cette mystérieuse matière manquante « matière noire ». Les astronomes préfèrent cette hypothèse, en grande partie parce que sa seule concurrente – l'hypothèse selon laquelle les lois de Newton sont fausses et par extension la relativité générale – est trop effrayante pour qu'on ose l'envisager.

Puis les choses sont devenues encore plus mystérieuses. Récemment, on a découvert que selon des observations à des échelles encore plus grandes, qui correspondent à des milliards d'années-lumière, les équations de la relativité générale ne sont pas satisfaites même en rajoutant la matière noire. L'expansion de l'univers, démarrée avec le Big Bang il y a quelque 13,7 milliards d'années, s'accélère, tandis que si l'on tient compte de toute la matière observée, plus la quantité calculée de la matière noire, l'expansion l'univers devrait au contraire ralentir.

Encore une fois, il y a deux explications possibles. Il se peut que la relativité générale soit tout simplement fausse. On l'a testée avec précision seulement à l'intérieur du système solaire et des systèmes voisins de notre galaxie. Peut-être, quand on atteint l'échelle de l'Univers, la relativité générale n'est-elle simplement pas applicable.

Une autre possibilité serait l'existence d'encore une nouvelle forme de matière – ou d'énergie (rappelez-vous l'équation d'Einstein $E = mc^2$, qui montre l'équivalence entre énergie et masse). Cette nouvelle forme d'énergie entrerait en jeu seulement à des échelles très grandes, c'est-à-dire qu'elle n'affecterait que l'expansion de l'Univers. Pour que cela soit possible, cette énergie nouvelle ne peut pas se rassembler aux alentours des galaxies ou même des amas de galaxies. Cette étrange nouvelle énergie que l'on envisage pour que les chiffres correspondent aux données s'appelle « énergie noire ».

La majorité des types de matière se trouvent sous pression, mais l'énergie noire exerce une tension – c'est-à-dire qu'elle retient et ramène les choses ensemble, au lieu de les écarter. C'est pour cette raison que la tension est parfois dite de « pression négative ». Pourtant, malgré le fait que l'énergie noire exerce une tension, elle fait en sorte que l'univers s'étende plus vite. Si cela vous trouble, je vous comprends. On pourrait croire que le gaz à pression négative agit comme un élastique, qui lie les galaxies et ralentit l'expansion. *Mais il se trouve que quand la pression négative est suffisamment négative, en relativité générale, elle produit un effet inverse*. Elle cause l'accélération, et non la décélération, de l'univers.

Les observations récentes nous révèlent un univers qui, en grande partie, est constitué d'inconnu. 70 % de la matière est sous forme d'énergie noire, 26 % sous forme de matière noire et seulement 4 % sous forme de matière ordinaire. En conséquence, moins d'une part sur vingt de la matière est observée expérimentalement et décrite à l'aide du modèle standard de la physique des particules. Des 96 % restant, excepté leurs propriétés déjà mentionnées, nous ne savons absolument rien.

Pendant les dix dernières années, les mesures cosmologiques sont devenues beaucoup plus précises. Cela est dû en partie à la loi de Moore, qui dit qu'environ tous les dix-huit mois, la vitesse des processeurs des puces des ordinateurs est multipliée par deux. Toutes les nouvelles expériences utilisent des micropuces, que ce soit dans les satellites ou les télescopes placés sur la Terre ; ainsi, avec le progrès des puces, les observations progressent aussi. Aujourd'hui, on a beaucoup appris à propos des caractéristiques fondamentales de l'univers, telles que la densité globale de la matière et le taux d'expansion. On possède maintenant le modèle standard de la cosmologie, de la même façon qu'il existe un modèle standard de la physique des particules. Tout comme son frère, le modèle standard de la cosmologie contient aussi une liste de constantes libres ; dans ce cas, il y en a environ quinze. Ces constantes comportent, entre autres, la densité des différents types de matière et d'énergie et leurs taux d'expansion. Personne ne sait rien de la raison pour laquelle ces constantes ont les valeurs qu'elles ont. Comme en physique des particules, ces valeurs sont fournies par les observations et ne sont pas encore expliquées par la théorie.

Les mystères cosmologiques sont à la source du cinquième grand problème.

Problème 5 : Expliquer la matière noire et l'énergie noire.
Ou, si elles n'existent pas, déterminer comment et pourquoi
la gravité est modifiée à grande échelle. Plus généralement,
expliquer pourquoi les constantes du modèle standard
de la cosmologie, y compris l'énergie noire,
ont les valeurs qu'elles ont.

Ces cinq problèmes marquent les limites de la connaissance actuelle. Ce sont eux qui empêchent les physiciens de dormir tranquillement la nuit. Ils motivent la majorité des travaux en cours sur les questions fondamentales de la physique théorique.

Toute théorie qui prétendra être la théorie fondamentale de la nature devra donner des réponses aux cinq problèmes. Un des buts de ce livre est d'évaluer les progrès des théories physiques récentes, telles que la théorie des cordes, dans cette voie. Mais, avant de commencer à étudier cette question, nous devons analyser quelques tentatives précédentes d'unification de la physique. De leurs succès et de leurs échecs, il nous reste encore beaucoup à apprendre.

2
Le mythe de la beauté

Comme dans un mauvais roman d'amour, le désir le plus cher des physiciens est l'unification. Réunir deux choses que l'on croyait séparées et les reconnaître comme les aspects d'une même chose : tel est le plus grand défi de la science.

Chaque fois qu'une unification est proposée, la seule réponse sensée est l'étonnement. *Le soleil est une étoile comme les autres – et les étoiles ne sont que des soleils qui se trouvent un peu trop loin !* Imaginez la réaction d'un forgeron ou d'un comédien de la fin du XVI^e^ siècle quand on lui a rapporté cette idée folle de Giordano Bruno. Que peut-il y avoir de plus absurde que d'unifier le Soleil et les étoiles ? Les gens pensaient que le Soleil était un grand feu créé par Dieu pour réchauffer la Terre, tandis que les étoiles étaient des petits trous dans la sphère céleste, à travers lesquels pénétrait la lumière du Paradis. Soudain, l'unification met le monde connu sens dessus dessous. Ce en quoi vous croyiez jusqu'à présent devient impossible. *Si les étoiles sont des soleils, alors l'univers est beaucoup plus grand que ce nous pensions ! Le paradis ne peut plus juste être là, en haut !*

Plus important encore, chaque nouvelle unification proposée émet des hypothèses, qui jusque-là relevaient de l'inimaginable. *Si les étoiles sont d'autres soleils, alors il doit y avoir des planètes autour d'elles, sur lesquelles des gens vivent !* Les implications vont souvent loin, au-delà même des frontières de la science. *S'il y a d'autres planètes avec d'autres gens dessus, alors ou Jésus est venu à eux tous, auquel cas sa venue à l'Homme n'a pas été un événement unique, ou tous ces gens perdent la possibilité d'être sauvés !* Il n'est guère étonnant que l'Église catholique fit brûler vif Giordano Bruno.

Les idées qui sont à l'origine des disciplines scientifiques nouvelles naissent des grandes unifications. Parfois, leurs conséquences mettent tellement en danger notre vision du monde que la surprise est rapidement suivie d'une période d'incrédulité. Avant Darwin, chaque espèce appartenait, pour l'éternité, à sa propre catégorie. Chacune avait été créée, individuellement, par Dieu. Mais l'évolution, à travers la sélection naturelle, signifie que toutes les espèces ont un ancêtre commun. Elles sont toutes unifiées en une grande famille unique. La biologie avant Darwin et la biologie après Darwin deviennent deux disciplines scientifiques complètement différentes.

Les avancées nouvelles et puissantes comme celle de Darwin mènent rapidement à des découvertes nouvelles. *Si toutes les choses vivantes ont un ancêtre commun, alors elles doivent être faites de façon plus ou moins similaire !* Et oui, nous *sommes* faits de la même substance, parce que toute vie est constituée de cellules. Les plantes, les animaux, les champignons, les bactéries semblent être très différents les uns des autres, mais ils ne sont que des groupes de cellules structurées de façons différentes. Les processus chimiques, qui construisent et fournissent ces cellules en énergie, sont les mêmes pour tous, tout au long de la grande histoire de la vie.

Si les unifications proposées sont si choquantes par rapport à nos manières de penser antérieures, comment est-il possible que les gens y croient ? Cette question, indépendamment du chemin qui nous mène à elle, est au cœur de notre histoire, puisque celle-ci est en fait une histoire des unifications auxquelles certains scientifiques croyaient avec une grande ferveur. Pourtant, aucune d'elles n'a jamais fait consensus parmi *tous* les scientifiques. En conséquence, nous assistons à des controverses très vives et, parfois, à un débat passionné, fruit d'une tentative de changer radicalement la vision du monde. Comment peut-on donc affirmer, lorsqu'un scientifique propose une nouvelle unification, que celle-ci est vraie ou pas ?

Comme on l'imagine, toutes les unifications proposées ne sont pas vraies. Ainsi, il y eut une époque où les chimistes proposèrent de traiter la chaleur en tant que substance, comme la matière. Cela s'appelait la « phlogistique ». Ce concept nouveau voulait unifier la chaleur et la matière. Mais il était faux. La proposition correcte pour l'unification de la chaleur et de la matière est celle qui explique que la chaleur est l'énergie du mouvement aléatoire des atomes. Pourtant, bien que l'atomisme ait été inventé par les anciens Indiens et les philosophes grecs, ce n'est qu'à la fin du XIX^{e} siècle que la théorie de la chaleur comme mouvement aléatoire des atomes a été sérieusement développée.

Dans l'histoire de la physique, beaucoup de propositions d'unification se révélèrent fausses. L'une d'entre elles, très célèbre, supposait que la lumière et le son étaient essentiellement la même chose : des vibrations de la matière. Puisque le son est une vibration dans l'air, selon cette proposition, la lumière devait être une vibration d'une matière d'un nouveau type, qui s'appellerait « éther ». Tout comme l'espace autour de nous est rempli d'air, l'univers serait rempli d'éther. Einstein a démenti cette idée, quand il a avancé sa propre proposition d'unification des théories.

Toutes les idées importantes étudiées par les physiciens ces trente dernières années – comme la théorie des cordes, la supersymétrie, les dimensions supérieures, les boucles, etc. – sont des propositions d'unification. Comment faut-il s'y prendre pour déterminer lesquelles d'entre elles sont bonnes et lesquelles ne le sont pas ?

J'ai déjà mentionné deux caractéristiques qui sont, dans presque tous les cas, communes aux unifications réussies. La première, *la surprise*, ne doit pas être sous-estimée. S'il n'y a pas de surprise, l'idée en question est soit inintéressante, soit quelque chose que nous savions déjà. La deuxième caractéristique est que les conséquences de l'unification doivent être spectaculaires : l'unification doit très rapidement mener à des hypothèses et des avan-

cées nouvelles, et elle doit devenir un véritable moteur du progrès dans notre compréhension du monde.

Mais il existe un troisième aspect, plus important que les précédents. Une bonne théorie unifiée doit faire des prédictions auxquelles personne n'avait pensé auparavant. Elle pourrait même suggérer des types nouveaux d'expériences, qui n'ont de sens que dans le cadre de cette nouvelle théorie. Et, plus important encore, les prédictions doivent être confirmées par l'expérimentation.

Ces trois critères, surprise, avancées nouvelles et prédictions inédites confirmées par l'expérience, sont ceux que l'on prendra en compte lorsque nous jugerons les efforts actuels d'unification.

Il semble que les physiciens ressentent un grand besoin d'unification, et certains considèrent que tout pas franchi sur le chemin de l'unification est un pas vers la vérité. Mais la vie n'est pas si simple. À tout moment, il peut y avoir plus d'une voie pour unifier les choses que nous connaissons et ces voies différentes mènent la science dans des directions tout à fait divergentes. Au XVI^{e} siècle, il existait deux propositions distinctes pour unifier la science. L'ancienne théorie d'Aristote et de Ptolémée d'un côté, selon laquelle les planètes, le Soleil et la Lune sont unifiés en tant que sphères célestes. De l'autre, la théorie nouvelle, celle de Copernic, qui unifiait les planètes et la Terre. Chacune des deux avait des conséquences scientifiques importantes. Une et une seule pouvait être vraie.

On a ici un aperçu du coût potentiel du mauvais choix d'une théorie unifiée. Si la Terre avait bien été au centre de notre Univers, cela aurait eu des conséquences très importantes dans notre manière d'appréhender le mouvement. Dans le ciel, les planètes changent de direction parce qu'elles sont attachées à des cercles dont la nature est d'être en rotation éternelle. Mais ceci n'advient jamais sur la Terre, où tout ce qui est poussé ou jeté, doit bientôt s'arrêter. Tel est l'état naturel des choses qui ne sont pas attachées aux cercles cosmiques. Par conséquent, dans l'univers de Ptolémée et d'Aristote, il existe une grande différence entre l'état de mouvement et l'état de repos.

Dans le monde de Ptolémée et d'Aristote, il existe également une distinction entre le ciel et la Terre : les objets terrestres obéissent à des lois différentes de celles qui régissent les objets dans le ciel. Ptolémée a avancé l'idée selon laquelle certains corps célestes – le Soleil, la Lune et les cinq planètes connues – tournent sur des cercles, qui eux-mêmes tournent sur d'autres cercles. Ce sont ces soi-disant épicycles qui ont permis de prédire les éclipses et le mouvement des planètes. Ces prédictions étaient exactes pour une sur mille, démontrant ainsi le succès de l'unification du Soleil, de la Lune et des planètes. Aristote a donné une explication naturelle du fait que la Terre est au centre de l'Univers : elle serait composée de la substance terrestre, dont la nature est non pas de tourner sur des cercles, mais de converger vers le centre.

Pour quelqu'un formé à croire ce point de vue et familiarisé avec sa puissance explicative du monde tel que nous le voyons, la proposition de Copernic de considérer que les planètes étaient de même nature que la Terre et non de celle du Soleil, ne pouvait qu'être profondément frustrante. Si la Terre est une planète, alors elle est, avec tout ce qui se trouve sur elle, en mouvement continu. Comment une chose pareille pourrait-elle être

possible ? Ceci violait la loi d'Aristote, selon laquelle tout ce qui n'est pas sur un cercle céleste doit parvenir au repos. Ceci allait aussi à l'encontre de l'expérience, car si la Terre est en mouvement, comment est-il possible que nous ne le sentions pas ?

La réponse à ce mystère fut la plus sensationnelle unification scientifique : l'unification du mouvement et du repos. Elle a été énoncée par Galilée et codifiée dans la première loi du mouvement de Newton, qui s'appelle aussi le « principe d'inertie » : un corps au repos ou en mouvement uniforme reste dans cet état de repos ou de mouvement uniforme, sauf s'il est dérangé par des forces.

Par « mouvement uniforme », Newton entendait un mouvement à vitesse constante, dans une seule direction. Être au repos ne devient qu'un cas particulier du mouvement uniforme : c'est le mouvement à vitesse nulle.

Comment est-il possible qu'il n'y ait pas de distinction entre le mouvement et le repos ? Pour répondre, il faut bien comprendre que la question de savoir si un corps est en mouvement ou pas n'a pas de sens dans l'absolu. Le mouvement est défini seulement par rapport à un observateur, qui, lui aussi, peut être en mouvement ou pas. Si vous êtes en train de passer derrière moi à une vitesse constante, alors la tasse de café que je perçois comme étant au repos sur ma table, de votre point de vue, est aussi en mouvement. Mais un observateur peut-il dire lui-même s'il est en mouvement ou pas ? Pour Aristote, la réponse était évidemment oui. Galilée et Newton étaient forcés de répondre non. Si la Terre est en mouvement, mais qu'on ne le ressent pas, cela ne peut que signifier que les observateurs en mouvement à vitesse constante ne ressentent aucun effet de leur mouvement. Par conséquent, on ne peut pas dire si l'on est soi-même au repos ou pas, et le mouvement doit être défini comme une quantité purement relative.

Pourtant, voici une réserve importante : il s'agit du mouvement uniforme, celui qui va selon une ligne droite. (Bien que la Terre ne se meuve évidemment pas sur une droite, les déviations de son mouvement par rapport à une droite sont trop petites pour qu'on les ressente.) Quand on change la vitesse ou la direction de son mouvement, on le perçoit distinctement. Ces changements ne font qu'un avec ce que nous appelons « accélération », et celle-ci, contrairement à la vitesse, *peut* avoir un sens dans l'absolu.

Galilée et Newton ont réalisé ici une avancée intellectuelle subtile et élégante. Il paraissait évident aux autres que le mouvement et le repos étaient des phénomènes complètement différents, faciles à distinguer. Le principe d'inertie les unifie. Pour expliquer pourquoi ces deux phénomènes semblent différents, Galilée a inventé le « principe de relativité ». Selon ce principe, la distinction entre ce qui est en mouvement et ce qui est au repos n'a de sens que relativement à un observateur. Puisque différents observateurs ont la capacité de se mettre en mouvement de plusieurs façons, ils distinguent les objets qui bougent et les objets au repos de façons différentes. Par conséquent, le fait que tout observateur perçoit cette distinction est maintenu. Ainsi, qu'une chose soit en mouvement ou pas cesse d'être un phénomène nécessitant explication. Pour Aristote, si quelque chose était en mouvement, alors il y avait nécessairement une force agissant sur cet objet. Pour Newton, si le mouvement est uniforme, il persistera à jamais, et aucune force n'est nécessaire pour l'expliquer.

Le coup de force newtonien relevait d'une stratégie puissante, qui a été répétée dans les théories suivantes. Une façon d'unifier des choses apparemment dissemblables est de montrer que la différence (apparente) est due à la différence de perspective d'observateurs différents. La dissemblance, que l'on avait crue absolue, devient donc relative. Ce genre d'unification est rare et représente la plus haute forme de créativité scientifique. Quand elle est atteinte, notre vision du monde change radicalement.

Les propositions d'unification, qui suggèrent que deux choses très différentes sont en fait les mêmes, demandent souvent un gros travail d'explication. On ne réussit que rarement à expliquer la différence apparente comme une conséquence de perspectives différentes. Dans d'autres cas, les deux choses que l'on voudrait unifier s'avèrent simplement vraiment différentes. En conséquence, la nécessité d'expliquer comment des choses qui paraissent différentes représentent d'une certaine façon une entité unique peut causer beaucoup de problèmes au théoricien.

Jetons un coup d'œil aux conséquences de la proposition de Bruno : les étoiles sont comme notre soleil. Pourtant, elles nous paraissent beaucoup plus sombres que le soleil. Si, toutefois, elles sont bien la même chose, alors elles doivent se trouver vraiment très loin. Les distances que Bruno a évoquées étaient beaucoup plus grandes que ce que l'on pensait être la taille de l'Univers à l'époque. Au premier regard, donc, la proposition de Bruno paraissait absurde.

Évidemment, c'était une occasion de faire une prédiction nouvelle : si l'on pouvait mesurer la distance jusqu'aux étoiles, alors on trouverait qu'elle était beaucoup plus grande que la distance jusqu'aux planètes. Si cela avait été possible à l'époque de Bruno, celui-ci aurait pu échapper au bûcher. Mais il a fallu attendre des siècles pour que la distance à une étoile puisse être mesurée. Ce que Bruno a fait, en termes pratiques, était de poser un énoncé invérifiable, étant donné les capacités techniques de l'époque. La proposition de Bruno a mis, de façon très commode, les étoiles à des distances telles que personne ne pouvait plus vérifier son idée.

Ainsi parfois, le besoin d'expliquer comment les choses pourraient être unifiées nous force à émettre des hypothèses nouvelles que nous ne sommes simplement pas capables de tester. Comme on l'a vu, ceci ne veut pas forcément dire que quelque chose fut mal réalisé, mais cela signifie sans doute que les auteurs de ces nouvelles unifications peuvent facilement se retrouver en terrain dangereux.

Cela peut être pire encore. Les nouvelles hypothèses ont tendance à se compliquer elles-mêmes. Copernic, en fait, avait besoin que les étoiles soient très loin. Si les étoiles étaient aussi proches que ce qu'Aristote croyait, on aurait pu réfuter l'affirmation selon laquelle la Terre est en mouvement, parce que, au fur et à mesure que la Terre change de position, les positions relatives des étoiles auraient dû aussi changer. Pour expliquer pourquoi cet effet n'a pas été observé, Copernic et ses disciples étaient forcés de croire que les étoiles étaient très éloignées. (Bien sûr, nous savons maintenant que les étoiles sont aussi en mouvement, mais les distances entre elles sont si énormes que leurs positions dans le ciel varient extrêmement lentement.)

Pourtant, si les étoiles sont si lointaines, comment est-il possible que nous les voyions ? Elles devraient être très lumineuses, peut-être aussi lumineuses que le soleil. Par conséquent, l'idée de Bruno d'un univers rempli d'un nombre infini d'étoiles allait naturellement de pair avec l'idée de Copernic d'une Terre en mouvement comme une simple planète.

On comprend avec cet exemple que les différentes unifications énoncées marchent souvent main dans la main. L'unification des étoiles et du soleil s'accompagne de l'unification de la Terre et des autres planètes ; ces deux unifications demandent à leur tour que mouvement et repos soient unifiés.

Ces idées, nouvelles au XVI^{e} siècle, se trouvaient en opposition avec d'autres. L'idée ptoléméenne selon laquelle les planètes sont unifiées avec le Soleil et la Lune et que l'ensemble est en mouvement selon les épicycles allait de pair avec la théorie aristotélicienne du mouvement, qui unifiait tous les types de phénomènes connus sur terre.

On se trouve ainsi en présence de deux groupes d'idées, dont chacun contient quelques propositions d'unification. Par conséquent, c'est souvent tout un groupe d'idées qui est en jeu, à l'intérieur duquel les différents éléments sont unifiés à des niveaux différents. Avant que le débat ne soit résolu, il y a de bonnes raisons de croire en chacune des positions. Chacune peut être vérifiée par les observations. Une seule expérience peut même parfois être interprétée comme une preuve pour deux théories unifiées en compétition.

Pour donner un exemple : considérez un ballon qu'on jette depuis le sommet d'une tour. Que se passe-t-il ? Le ballon tombe et atterrit au pied de la tour. Il ne s'envole pas en direction de l'Orient ou de l'Occident. On pourrait alors dire que Copernic et ses disciples n'ont évidemment pas raison, parce que cette expérience prouve que la Terre ne tourne pas autour de son axe. Si la Terre tournait autour de son axe, alors le ballon aurait atterri bien loin du pied de la tour.

Mais Galilée et Newton pourraient aussi dire que le ballon qui tombe prouve leur théorie. Le principe d'inertie nous dit que si le ballon va vers l'est avec la Terre, au moment où il est jeté, alors il continue d'aller vers l'est durant sa chute. Mais le ballon va vers l'est à la même vitesse que la tour et, par conséquent, il tombe à ses pieds. La même expérience qu'un philosophe aristotélicien pourrait utiliser pour réfuter la théorie de Galilée est utilisée par ce dernier pour démontrer que sa théorie est correcte.

Alors, comment décidons-nous néanmoins que telles idées sont valides pour une théorie unifiée et que telles autres ne le sont pas ? Tôt ou tard vient le moment où nous avons suffisamment de preuves. Une hypothèse devient tellement fructueuse que toute personne rationnelle n'a d'autre choix que de l'accepter. Concernant la révolution newtonienne, l'observation a apporté les preuves du mouvement de la Terre par rapport aux étoiles, mais avant même que cela ne se produise, les lois de Newton avaient prouvé leur efficacité dans un si grand nombre de cas qu'il était impossible de revenir en arrière et de les rejeter.

Néanmoins, au cours d'une révolution scientifique, il existe parfois des arguments rationnels pour prouver des hypothèses concurrentes. Nous sommes actuellement dans une telle période, et nous examinerons les propositions concurrentes d'unification dans les chapitres à venir. Je ferai de mon mieux pour expliquer les arguments qui soutiennent les

différents aspects du débat, tout en montrant pourquoi les chercheurs doivent encore parvenir à un consensus.

Bien sûr, nous devons être prudents. Certaines preuves expérimentales, dont on dit qu'elles soutiennent telle ou telle position, ne sont pas bien fondées. Parfois, les arguments que l'on invente pour soutenir une théorie en difficulté ne sont que des rationalisations. J'ai rencontré récemment un groupe de scientifiques, tous debout dans un couloir d'avion qui volait entre Londres et Toronto. Ils m'ont dit bonjour et m'ont demandé ce que je faisais en Angleterre. Quand j'ai répondu que je revenais d'un colloque sur la cosmologie, ils m'ont tout de suite interrogé sur mon point de vue concernant l'évolution. « Oh non ! » ai-je pensé ; puis je leur ai dit que la sélection naturelle avait été prouvée sans aucun doute possible. Ils se sont présentés comme membres d'un collège biblique, de retour d'une mission en Afrique dont l'un des buts, comme ils me l'ont expliqué, était de tester quelques principes du créationnisme. Puis, ils ont voulu m'engager dans la discussion, mais je les ai prévenus qu'ils perdraient le débat, parce que je connaissais bien les preuves. « Non » ont-ils insisté, « vous ne connaissez pas tous les faits. » Donc, c'était parti. Quand je leur ai dit : « Mais, bien sûr, vous acceptez le fait que nous avons des fossiles de nombreuses créatures qui n'existent plus », ils m'ont répondu : « Mais non !

– Que voulez-vous dire, mais non ? Que fait-on des dinosaures, par exemple ?
– Les dinosaures sont toujours vivants et se baladent sur la Terre.
– Mais c'est ridicule ! Où ?
– En Afrique.
– En Afrique ? L'Afrique est pleine de gens. Les dinosaures sont vraiment très grands. Comment est-il possible que personne ne les ait jamais rencontrés ?
– Ils habitent très loin dans la jungle.
– De toute façon, quelqu'un en aurait vu un. Voulez-vous dire que vous connaissez quelqu'un qui a vu un dinosaure ?
– Les Pygmées nous disent qu'ils en voient souvent. Nous avons cherché et nous n'en avons pas vu nous-mêmes, mais nous avons vu les éraflures qu'ils laissent à la hauteur de dix-huit à vingt pieds, sur les troncs des arbres.
– Alors vous êtes d'accord sur le fait que ce sont de grands animaux. Et les fossiles prouvent que les dinosaures vivent en troupeaux. Comment est-il possible que personne, sauf ces Pygmées, ne les ait jamais vus ?
– Mais c'est facile ! Ils passent la majorité de leur temps en hibernation dans les cavernes.
– Dans la jungle ? Y a-t-il des cavernes dans la jungle ?
– Oui, bien sûr, pourquoi pas ?
– Des cavernes assez larges pour qu'un énorme dinosaure puisse y entrer ? Si les cavernes sont si grandes, alors elles doivent être faciles à trouver, et on pourra regarder ce qui est à l'intérieur et voir les dinosaures endormis.
– Pour se protéger lorsqu'ils sont en hibernation, les dinosaures ferment les entrées de leurs cavernes avec de la poussière et de la terre, pour que personne ne puisse savoir qu'ils sont dedans.

– Comment peuvent-ils fermer si bien les entrées que personne ne puisse les voir ? Utilisent-ils leurs pattes ? Ou peut-être déplacent-ils la terre et la poussière avec leurs nez ? »

À ce stade, les créationnistes ont admis qu'ils ne savaient pas répondre, mais m'ont assuré que des « biologistes bibliques » de leur école étaient dans la jungle au moment même de notre conversation, en train de chercher les dinosaures.

« Promettez-moi que vous m'en direz un mot quand ils les auront trouvés », leur ai-je dit. Puis je suis retourné à ma place.

Je n'invente pas cette histoire. Je ne la raconte pas non plus pour vous amuser. Elle illustre comment la rationalité n'est pas toujours un exercice simple. D'habitude, il est rationnel de ne pas croire une théorie qui prédit quelque chose que l'on n'a jamais vu. Mais parfois, il y a de bonnes raisons en faveur de quelque chose qui n'a jamais été vu. Après tout, s'il y a des dinosaures, il est clair qu'ils doivent se cacher quelque part. Alors, pourquoi pas dans les cavernes de la jungle africaine ?

Cela peut paraître stupide, mais les physiciens des particules ont plus d'une fois ressenti le besoin d'inventer une particule jamais vue, comme par exemple le neutrino, afin de donner un sens aux résultats théoriques ou mathématiques. Afin d'expliquer pourquoi il est si difficile de le détecter, les physiciens ont fait en sorte que le neutrino n'interagisse que très faiblement avec le reste de la matière. Dans ce cas concret, cette stratégie était la bonne, car, plusieurs années après, quelqu'un a pu réaliser une expérience qui a permis de découvrir les neutrinos. Tout comme cela avait été prédit, les neutrinos enregistrés n'interagissaient que très faiblement avec le reste de la matière.

Par conséquent, il est parfois sensé de ne pas jeter une théorie à la poubelle lorsqu'elle prédit quelque chose qui n'a jamais été observé. De temps en temps, les hypothèses qu'on est obligé d'avancer s'avèrent correctes. En inventant une pareille hypothèse *ad hoc*, on parvient non seulement à sauver une idée plausible, mais même, parfois, à prédire des phénomènes nouveaux. Pourtant, arrive aussi un moment où l'on commence à être incrédule. Les dinosaures qui habitent les cavernes provoquent probablement une certaine incrédulité. Décider du moment où une bonne idée de départ entraîne trop de complications pour continuer à être exploitée est d'abord une question de jugement personnel. Des situations où des personnes bien formées et intelligentes campaient sur des positions différentes ont certainement eu lieu. Mais, finalement, une limite est atteinte lorsque la prédominance des preuves expérimentales est telle qu'aucune personne rationnelle et intelligente ne peut encore croire plausible l'idée en question.

Pour déterminer si cette limite est atteinte, une méthode consiste à analyser la question de l'unicité. Au cours d'une révolution scientifique, quelques propositions différentes d'unification sont parfois mises sur la table, au même moment, risquant de conduire la science dans des directions opposées. Cette situation est normale et, en pleine époque révolutionnaire, on n'a pas besoin de raisons rationnelles pour préférer certaines hypothèses à d'autres. En une pareille époque, même des scientifiques très avisés, s'ils sont poussés à choisir parmi des points de vue concurrents, feront souvent un mauvais choix.

Cependant, il se peut qu'une certaine proposition d'unification finisse par expliquer beaucoup plus que les autres ; c'est souvent la proposition la plus simple. Au moment où une seule proposition a déjà largement pris de l'avance, en termes de production de nouvelles idées, en accord avec l'expérience, de puissance d'explication et de simplicité, cette proposition prend l'allure d'unification unique. On dit alors qu'elle porte le sceau de la vérité.

Par exemple, considérons trois unifications proposées par la même personne, l'astronome allemand Johannes Kepler (1571-1630). L'obsession de toute sa vie était les planètes. Puisqu'il croyait que la Terre en était une, il en comptait six, de Mercure à Saturne. Comme leurs mouvements dans le ciel avaient été observés pendant plus d'un millénaire, Kepler avait en sa possession un grand nombre de données. Les plus précises venaient de Tycho Brahé, un astronome danois. Kepler partit donc travailler avec Tycho pour essayer d'obtenir ses données (il les a volées après la mort de Tycho, mais c'est une autre histoire).

Chaque orbite planétaire a un diamètre. Chaque planète a aussi une vitesse orbitale. De plus, les vitesses ne sont pas uniformes ; les planètes accélèrent et ralentissent sur leurs orbites au fur et à mesure de leur rotation autour du Soleil. Tous ces nombres paraissent arbitraires. Pendant toute sa vie, Kepler a cherché un principe qui aurait pu unifier les mouvements des planètes et, ainsi, expliquer les données expérimentales au sujet des orbites planétaires.

La première tentative de Kepler d'unifier les planètes s'inscrivait dans la lignée de la tradition ancienne suivant laquelle la théorie cosmologique doit seulement utiliser les figures géométriques les plus simples. Une des raisons pour laquelle les Grecs croyaient à des cercles qui tournent sur d'autres cercles, était que l'on ne peut faire plus simple qu'un cercle et, par conséquent c'était, pour les Grecs, la plus belle des courbes fermées. Kepler cherchait des figures géométriques d'une beauté comparable, qui pourraient expliquer les tailles des orbites planétaires. Et il a trouvé une idée très élégante, illustrée sur la figure 1.

Supposons donnée l'orbite de la Terre. Il reste cinq valeurs à expliquer : le rapport du diamètre des cinq autres orbites des planètes au diamètre de l'orbite de la Terre qui, si nous comptons les expliquer, ne peuvent que s'intégrer dans une construction géométrique très belle, qui produirait exactement les cinq nombres en question. Pas plus et pas moins. Alors, existe-t-il en géométrie un problème qui admettrait exactement cinq solutions ?

Oui. Le cube est un corps solide parfait, dont chaque face est égale à chaque autre face et dont toute arête a la même longueur que toutes les autres. Les corps solides possédant ces propriétés s'appellent « solides platoniciens ». Combien y en a-t-il ? Exactement cinq : le cube dont nous avons déjà parlé, puis le tétraèdre, l'octaèdre, le dodécaèdre et l'icosaèdre.

Il n'a pas fallu longtemps pour que Kepler fasse une stupéfiante découverte. Inscrivez l'orbite de la Terre dans une sphère. Ajustez-lui un dodécaèdre dans lequel vient s'inscrire cette sphère. Mettez par-dessus encore une sphère. L'orbite de Mars est inscrite dans cette sphère. Ajustez un tétraèdre autour de cette sphère, et puis une autre sphère autour du

tétraèdre. Jupiter est inscrit dans cette sphère. Autour de l'orbite de Jupiter, on place un cube et ensuite une sphère autour de lui : dans cette dernière se trouve Saturne. À l'intérieur de l'orbite de la Terre, Kepler a placé un icosaèdre, autour duquel tournait Vénus ; et à l'intérieur de l'orbite de Vénus, un octaèdre pour Mercure.

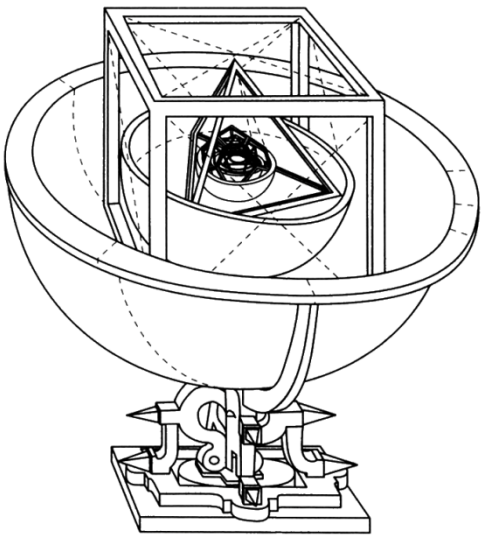


Figure I. La première théorie de Kepler sur le système solaire, fondée sur les solides platoniciens.

Cette théorie unifiée a expliqué le diamètre des orbites des planètes, ce qu'aucune autre théorie n'avait jamais fait auparavant. Elle était mathématiquement élégante. Alors, pourquoi n'y a-t-on pas cru ? Quelle que soit son attraction, la théorie ne menait nulle part. Elle n'a prédit aucun phénomène nouveau. Elle n'a même pas donné une explication de la vitesse orbitale des planètes. Le concept était trop statique ; il unifiait, oui, mais il n'a pas ouvert de nouveaux horizons scientifiques.

Kepler y a réfléchi longtemps. Puisque le diamètre des orbites était déjà expliqué, il ne restait plus qu'à expliquer la vitesse des différentes planètes. Finalement, il proposa ceci : lorsque les planètes se déplacent, elles « chantent », et les fréquences de leurs chants sont proportionnelles à leurs vitesses. Les notes entonnées par les différentes planètes, lorsqu'elles voyagent sur leurs orbites, forment une harmonie à six voix, que Kepler a appelée « harmonie des sphères ».

Cette idée a, elle aussi, des racines anciennes qui remontent à la découverte par Pythagore des sources de l'harmonie musicale qui se trouvent dans le rapport entre les nombres. Elle souffre cependant d'un problème évident. En effet, elle n'est pas unique : il existe plusieurs harmonisations élégantes à six voix. Pire, on a vite découvert qu'il existait bien plus de six planètes. Galilée, un contemporain de Kepler, a découvert quatre lunes, qui tournaient sur des orbites autour de Jupiter. Il y avait donc encore un nouveau système orbital dans le ciel. Si les théories de Kepler étaient correctes, elles auraient dû s'appliquer à ce nouveau système orbital. Mais elles ne s'y appliquaient pas.

À part ces deux propositions concernant la structure mathématique du cosmos, Kepler a fait trois autres découvertes, qui, en revanche, ont mené à un réel progrès scientifique et qui l'ont rendu célèbre. Il en a fait la proposition après des années passées à analyser, dans la douleur, les données volées à Tycho. Ces trois lois n'ont guère la beauté et l'élégance des autres idées de Kepler, mais elles fonctionnent. De plus, l'une d'elles lui a permis d'aborder un problème qu'il ne parvenait pas à résoudre autrement, à savoir la relation entre la vitesse et le diamètre des orbites. Les trois lois de Kepler non seulement s'accordaient avec les données sur les six planètes, mais s'accordaient également avec les observations des lunes de Jupiter.

Kepler a découvert ces lois parce qu'il a su mener l'unification copernicienne à sa conclusion logique. Copernic disait que le soleil était au (en fait, près du) centre de l'Univers, mais, dans sa théorie, les planètes suivaient les mêmes trajectoires indépendamment du fait que le soleil se trouve, ou pas, à cet endroit. Le seul rôle du soleil était d'éclairer la scène. Le succès de la théorie copernicienne a forcé Kepler à se demander s'il était envisageable que la place relativement centrale du soleil dans chacune des orbites planétaires soit plus qu'une simple coïncidence. Il voulait savoir si le soleil pouvait jouer un rôle causal dans la détermination des orbites planétaires. Peut-être le soleil exercerait-il une force sur les planètes et cette force ne serait rien de moins que l'explication de leurs mouvements ?

Pour répondre à ces questions, Kepler a d'abord dû trouver le rôle de la position exacte du Soleil dans chacune des orbites. Sa première grande avancée fut de découvrir que les orbites n'étaient pas des cercles, mais des ellipses. Le soleil y tenait un rôle bien précis : il se trouvait exactement au point focal de l'ellipse de chaque orbite. C'était la première loi. Peu de temps après, Kepler découvrit sa deuxième loi, selon laquelle la vitesse de la planète sur son orbite s'accroît et décroît selon que celle-ci s'approche ou s'éloigne du soleil. Plus tard, il découvrit la troisième loi, qui régit les relations entre la vitesse des différentes planètes.

Ces lois indiquent qu'il doit y avoir une unité profonde dans le système solaire, parce qu'elles s'appliquent à toutes les planètes. Le gain de ces découvertes est que, pour la première fois, une théorie est capable de faire des prédictions. Supposez qu'une nouvelle planète soit découverte. Pouvons-nous prédire quelle sera son orbite ? Avant Kepler, personne ne le pouvait. Mais étant donné les lois de Kepler, tout ce dont nous avons besoin aujourd'hui, ce sont deux observations de la position de la planète. Sur cette seule base, nous pouvons prédire son orbite.

Les découvertes de Kepler ont ouvert la voie à Newton. C'est la remarquable perspicacité de Newton qui lui a permis de comprendre que la force exercée par le Soleil sur les planètes est la même force que celle de la gravité qui nous retient sur terre et, en conséquence, d'unifier la physique des cieux avec la physique terrestre.

Certes, du point de vue de la majorité des scientifiques de l'époque, l'idée d'une force émanant du Soleil en direction des planètes était absurde. Ceux-ci croyaient que l'espace était vide ; il n'y avait donc aucun médium pour transporter une telle force. De plus, il n'y

avait pas de manifestation visible de cette force : pas de bras tendu depuis le Soleil vers chaque planète ; et rien de ce qui était invisible ne pouvait être réel.

Il y a dans cette histoire de bonnes leçons à retenir pour les prétendants unificateurs. La première est que la beauté mathématique peut ne mener nulle part. De simples observations fondées sur des données expérimentales auront souvent plus d'importance. La deuxième leçon est que les unifications correctes produisent des conséquences sur le plan des phénomènes, et personne ne soupçonne quelles seront ces conséquences au moment où l'unification est inventée, comme ce fut le cas avec l'application des lois de Kepler aux lunes de Jupiter. Les unifications correctes posent aussi des questions qui, sur l'instant, peuvent paraître absurdes, mais qui mènent vers les unifications futures, comme dans le postulat de Kepler d'une force émanant du soleil en direction des autres planètes.

Plus important encore, on voit ici qu'une véritable révolution demande souvent que des propositions d'unification nouvelles soient réunies pour qu'elles se confortent mutuellement. Dans le cas de la révolution newtonienne, les unifications proposées ont triomphé conjointement, au même moment : l'unification de la Terre avec les planètes, l'unification du Soleil avec les étoiles, l'unification du repos et du mouvement uniforme et celle de la force gravitationnelle sur la Terre avec la force qui permet au Soleil d'influencer le mouvement des planètes. Considérée seule, séparément des autres, aucune de ces idées nouvelles ne pouvait survivre ; ensemble, elles ont vaincu tous leurs adversaires. En a suivi la révolution qui transforma radicalement notre compréhension de la nature.

Dans l'histoire de la physique, il existe une unification qui, plus que tout autre, sert de modèle à ce que les physiciens ont essayé d'accomplir ces trente dernières années. Il s'agit de l'unification de l'électricité et du magnétisme, achevée par James Clerk Maxwell dans les années 1860. Maxwell a profité d'un concept puissant, « le champ », inventé par le physicien britannique Michael Faraday dans les années 1840 pour expliquer comment une force pourrait être portée d'un corps à un autre à travers l'espace vide. Un champ est une quantité qui possède une valeur (un nombre) à chaque point de l'espace. Lorsque l'on se déplace dans l'espace, la valeur du champ varie de façon continue. La valeur à un point donné de l'espace varie aussi dans le temps. La théorie nous dicte des lois qui décrivent la façon précise dont le champ varie lorsqu'on se déplace dans l'espace et dans le temps. Selon ces lois, la valeur du champ en un point donné est influencée par la valeur du champ aux points voisins. Le champ en un point peut également être influencé par un corps matériel au même point. Ainsi, le champ peut transmettre une force d'un corps à un autre. On n'a plus aucun besoin de croire en l'action à distance.

Un des champs étudiés par Faraday était le champ électrique. Celui-ci n'est pas un nombre mais un vecteur, qui se visualise comme une flèche qui peut varier en direction et en longueur. Imaginez qu'une telle flèche se trouve en chaque point de l'espace. Imaginez que les pointes des flèches en des points voisins soient attachées les unes aux autres par un élastique. Si je tire une flèche, elle entraînera les autres, qui lui sont voisines. Les flèches sont aussi influencées par les charges électriques. L'effet de cette influence est que les flè-

ches s'organisent de telle sorte qu'elles pointent vers les charges voisines négatives et se détournent des charges voisines positives (voir figure 2).

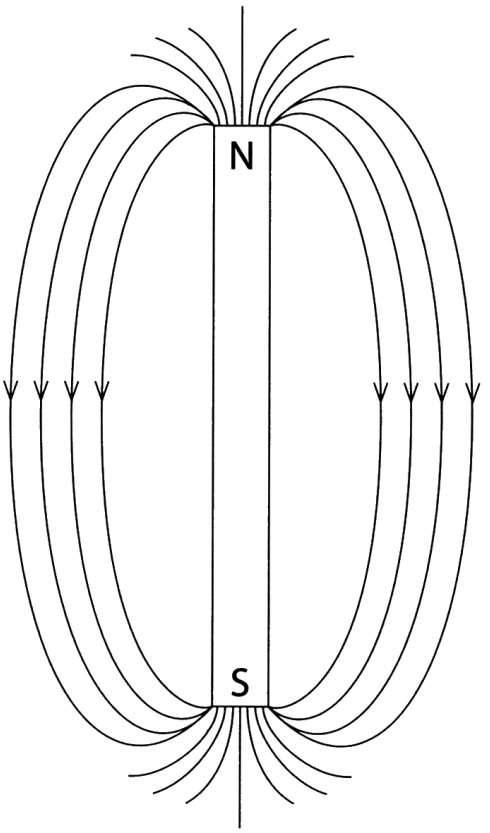


Figure 2. Des lignes de force dessinent le champ magnétique issu d'un aimant.

Faraday a également étudié le magnétisme. Il a inventé un autre champ, donc une autre collection de flèches, qu'il a appelé « champ magnétique » ; ces flèches pointent vers les pôles des aimants.

Faraday a mis sur papier des lois simples pour décrire la manière dont les flèches du champ électrique et du champ magnétique sont influencées par les charges voisines et les pôles magnétiques et aussi par les flèches des champs adjacents. En collaboration avec des collègues, il a testé ces lois et a trouvé qu'elles donnaient des prédictions qui s'accordaient avec l'expérience.

Parmi les découvertes de l'époque, il y eut les phénomènes associant les effets électriques et magnétiques. Par exemple, une charge en mouvement circulaire donnait naissance à un champ magnétique. Maxwell a compris que ces découvertes étaient des indices de l'unification de l'électricité et du magnétisme. Pour les unifier entièrement, il dut modifier les équations. Ceci fait, en n'y ajoutant qu'un seul terme nouveau, son unification engendra des conséquences tangibles.

Les nouvelles équations ont permis aux champs électrique et magnétique de se transformer l'un en l'autre. Ces transmutations produisent des configurations tournantes qui se

déplacent dans l'espace comme des ondes, dans lesquelles se trouve un champ électrique, laissant place à un champ magnétique. Ces ondes tournantes peuvent être engendrées, entre autres, par l'oscillation d'une charge électrique. Elles peuvent transporter de l'énergie d'un endroit à un autre.

Le plus étonnant est que Maxwell put calculer la vitesse de ces ondes à partir de sa théorie ; et il trouva qu'elle avait la même vitesse que la lumière. Cela dut le frapper. *Les ondes qui passent à travers les champs électrique et magnétique sont la lumière*. Il n'était pas dans l'intention de Maxwell d'inventer une théorie de la lumière, il a seulement voulu unifier l'électricité et le magnétisme. Mais ce faisant, il a accompli quelque chose de plus important. Voici donc comment une bonne unification peut avoir des conséquences imprévues à la fois sur la théorie et sur l'expérience.

De nouvelles prédictions ont immédiatement suivi. Maxwell a compris qu'il devait exister des ondes électromagnétiques dans toutes les fréquences et pas seulement dans celles qui correspondent à la lumière visible ; cela aboutit à la découverte de la radio, de la lumière infrarouge et ultraviolette, etc. Cet exemple illustre une autre leçon : lorsque quelqu'un propose une nouvelle unification correcte, les implications en deviennent très vite évidentes. Dans le cas de Maxwell, beaucoup de ces phénomènes ont été observés dans les toutes premières années qui suivirent la publication de sa théorie.

C'est un point qu'il sera important de se rappeler lorsque nous discuterons d'autres tentatives d'unification. Toutes les unifications ont ce genre de conséquences car elles dirigent notre attention sur des phénomènes liés précisément à l'équivalence nouvelle des éléments unifiés. Dans les cas de réussite, ces phénomènes sont rapidement observés, et les inventeurs peuvent alors se féliciter du succès de leur unification. Mais nous verrons aussi que, dans d'autres cas, les phénomènes prédits entrent parfois en conflit avec l'observation. Dans ce cas, les partisans de l'unification ont le choix entre abandonner leur théorie ou la contraindre artificiellement pour pouvoir cacher les conséquences de l'unification.

Au moment même où elle triomphait, l'unification par Maxwell de l'électricité et du magnétisme était confrontée à un obstacle important. Au milieu du XIX^{e} siècle, la plupart des physiciens croyaient que la physique était déjà unifiée parce que tout était constitué par la matière (et ne pouvait pas être constitué autrement, afin de satisfaire aux lois de Newton). Pour ces « mécanistes », l'idée d'un champ, qui est juste là dans l'espace, était difficile à accepter. Pour eux, la théorie de Maxwell n'avait aucun sens sans quelque chose dont le pliage et l'étirage constitueraient la vraie réalité derrière les champs électrique et magnétique. Quelque chose de matériel doit frissonner, quand une onde lumineuse voyage d'une fleur à l'œil de celui qui la regarde.

Faraday et Maxwell étaient eux-mêmes des mécanistes, et ils ont consacré beaucoup de temps et d'efforts pour résoudre ce problème. Ils n'étaient pas seuls ; des jeunes gens dans des institutions de renom inventaient des constructions très élaborées consistant en des embrayages microscopiques, des poulies et des courroies, censés faire tourner en coulisses les équations de Maxwell. Des prix scientifiques étaient distribués à ceux qui pouvaient résoudre les équations très compliquées qui en résultaient.

Une manifestation évidente du problème était que la lumière vient jusqu'à nous depuis le Soleil et les étoiles, et que l'espace extérieur est pourtant vide de toute matière. S'il y avait de la matière dans l'espace, elle aurait retardé le mouvement des planètes, qui par conséquent auraient dû, il y a bien longtemps, retomber sur le Soleil. Mais comment était-il possible que les champs électrique et magnétique existent dans le vide ?

Les mécanistes ont alors inventé une nouvelle substance – l'éther – et en ont rempli tout l'espace. L'éther avait des propriétés paradoxales : il devait être extrêmement dense et rigide, pour que la lumière ne soit essentiellement qu'une onde sonore la traversant. Le rapport très élevé entre la vitesse de la lumière et celle du son ne devait être qu'une conséquence de l'incroyable densité de l'éther. En même temps, l'éther ne devait causer aucune résistance au passage de la matière ordinaire à travers lui. Tout cela était plus difficile à expliquer qu'on le croit. Il est possible de dire que l'éther et la matière ordinaire n'interagissent simplement pas entre eux, c'est-à-dire, qu'ils n'exercent aucune force l'un sur l'autre. Mais, alors, pourquoi la matière ordinaire détecterait-elle la lumière – ou les champs électrique et magnétique – alors que ceux-ci ne sont que des tensions dans l'éther ? Il n'est guère étonnant que des postes de professeur aient été attribués à ceux qui ont pu trouver des solutions intelligibles à toutes ces questions.

Pouvait-il y avoir une unification plus élégante que la théorie de l'éther ? Dans celle-ci, non seulement la lumière, l'électricité et le magnétisme étaient unifiés, mais leur unification était, elle aussi, unifiée avec la matière.

Néanmoins, quand la théorie de l'éther fut développée, la conception physique de la matière était aussi en train de changer. Au début du XIX^e^ siècle, la majorité des physiciens pensaient que la matière était continue ; mais les électrons ont été découverts à la fin du siècle, et l'idée que la matière pouvait être constituée d'atomes a commencé à être prise plus au sérieux – au moins, par certains physiciens. Cela les a, ensuite, forcés à se poser encore une autre question : quelle était la place des atomes et des électrons dans un monde fait d'éther ?

Dessinez les lignes d'un champ, comme celles du champ magnétique d'un aimant qui va du pôle Nord au pôle Sud. Les lignes de champs ne finissent jamais, sauf si elles se terminent sur un pôle de l'aimant ; c'est l'une des lois de Maxwell. Mais elles peuvent constituer des cercles fermés, et ces cercles peuvent se rassembler en nœuds. Il est alors possible que les atomes ne soient que des nœuds formés des lignes du champ magnétique. Mais comme le sait tout marin, il existe plusieurs façons différentes de faire un nœud. C'est sans doute une bonne chose, car il existe des types différents d'atomes. En 1867, Lord Kelvin a avancé l'idée selon laquelle des atomes différents correspondraient à des nœuds différents.

Cela peut paraître absurde, mais rappelez-vous qu'à l'époque on ne savait que très peu de choses à propos des atomes. On ne savait rien à propos des noyaux et on n'avait jamais entendu parler de protons ou de neutrons. Par conséquent, tout cela n'était pas aussi fou que l'on pourrait croire.

À l'époque, on savait aussi très peu de choses à propos des nœuds. Personne ne pouvait dire combien il y avait de façons différentes de faire un nœud ou de le défaire. Inspirés par les physiciens, les mathématiciens ont alors commencé à étudier le problème de la distinc-

tion des différents nœuds possibles. Peu après, cette recherche a donné naissance à tout un domaine des mathématiques, la « théorie des nœuds ». Il a bientôt été démontré qu'il existe une infinité de façons de faire un nœud, mais il a fallu du temps avant qu'on apprenne à les différencier. Un petit progrès a été accompli dans les années 1980, mais il n'en reste pas moins vrai qu'à ce jour nous n'avons aucun moyen de dire si deux nœuds compliqués sont différents ou pas.

C'est ainsi qu'une bonne idée d'unification, même réfutée par la suite, peut inspirer de nouvelles voies de recherche. Cependant, il nous faut toujours garder en tête que si la nouvelle théorie est fructueuse pour les mathématiques, cela ne signifie pas que la théorie physique est correcte. Sinon, le succès de la théorie des nœuds aurait pu nous incliner à croire que les atomes sont des nœuds dans le champ magnétique.

Il y eut encore un problème : la théorie de Maxwell était apparemment en contradiction avec le principe de relativité de la physique newtonienne. On a découvert qu'en faisant des expériences diverses, y compris en mesurant la vitesse de la lumière, les observateurs qui étudiaient le champ électromagnétique pouvaient dire s'ils étaient eux-mêmes en mouvement.

Voici maintenant la racine du conflit entre deux unifications, toutes deux centrales en physique newtonienne : l'unification de toutes les choses comme matière obéissant aux lois de Newton *versus* l'unification du mouvement et du repos. Pour beaucoup de physiciens, la réponse au problème était évidente : le concept de l'univers matériel était plus important que le fait – peut-être accidentel – qu'il n'était pas facile de détecter le mouvement. Mais quelques-uns parmi les physiciens ont considéré le principe de relativité comme plus important. L'un d'eux était un jeune homme de vingt-six ans, étudiant à Zurich, qui s'appelait Albert Einstein. Il méditait sur ce mystère depuis ses seize ans. En 1905, il comprit enfin que la solution ne demandait rien d'autre qu'une révision complète de notre façon d'appréhender l'espace et le temps.

Einstein a résolu le mystère en utilisant le même stratagème génial que Newton et Galilée pour établir la relativité du mouvement. Il a compris que la distinction entre les effets électriques et magnétiques dépend du mouvement de l'observateur. En conséquence, l'unification de Maxwell a été plus profonde que Maxwell lui-même ne l'avait soupçonné. Non seulement les champs électrique et magnétique sont des aspects distincts du même phénomène, mais des observateurs différents définiraient cette distinction de manière différente ; un premier observateur expliquerait ainsi un phénomène donné en termes d'électricité, alors qu'un autre en mouvement par rapport au premier le ferait en termes de magnétisme. Les deux seraient néanmoins d'accord sur les événements qui se produiraient. La théorie restreinte de la relativité d'Einstein a ainsi vu le jour, comme le lien entre l'unification par Galilée du repos et du mouvement et l'unification par Maxwell de l'électricité et du magnétisme.

Cette découverte eut de nombreuses conséquences. L'une d'elle est que la lumière doit avoir une vitesse universelle, indépendante du mouvement de l'observateur. Une autre est qu'il doit y avoir une unification de l'espace et du temps. Antérieurement, il existait une distinction nette entre les deux : le temps était universel, et tout le monde était d'accord

sur ce que signifiait le fait que deux événements se produisent simultanément. Einstein a montré que des observateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre ne seront plus d'accord sur le fait que deux événements, à des endroits différents, se produisent en même temps, ou pas. Cette unification est restée implicite dans son article de 1905 intitulé « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement ». En 1907, elle a été énoncée explicitement par un des maîtres d'Einstein, Hermann Minkowski.

On retrouve, ici encore, le cas où deux tentatives d'unifier la physique se trouvent en compétition. Les mécanistes ont avancé une idée très élégante : tout est matière, alors qu'Einstein croyait en un autre type d'unification, celle du mouvement et du repos. Pour soutenir son point de vue, il a dû inventer une unification encore plus profonde, celle de l'espace et du temps. À chaque fois, des choses qu'on croyait totalement distinctes se sont révélé ne l'être que par rapport au mouvement de l'observateur.

Le conflit entre ces deux propositions d'unification fut finalement résolu par l'expérimentation. Si l'on croyait les mécanistes, on croyait de même que l'observateur pouvait mesurer sa vitesse à travers l'éther. Si l'on croyait Einstein, on savait qu'il ne le pouvait pas, puisque tous les observateurs sont équivalents.

Quand Einstein a proposé la relativité restreinte en 1905, quelques tentatives avaient déjà eu lieu pour détecter le mouvement de la Terre à travers l'éther et toutes avaient échouée[2]. Les adeptes de la théorie de l'éther venaient donc d'ajuster leurs prédictions pour qu'il soit de plus en plus difficile de détecter le mouvement de la Terre. C'était une tâche facile, car ils utilisaient pour leurs calculs la théorie de Maxwell, qui, interprétée correctement, était en accord avec la position d'Einstein, à savoir que le mouvement y était indétectable. Ainsi, les mécanistes possédaient déjà les bonnes équations. Ils en avaient juste une mauvaise interprétation.

Pour ce qui est d'Einstein lui-même, on ne sait pas vraiment s'il était au courant des premiers tests expérimentaux mais, de toute façon, ceux-ci n'auraient eu aucune influence sur lui, puisqu'il était déjà convaincu que le mouvement de la Terre n'était pas détectable. En fait, à cette époque, Einstein était seulement en train de commencer ses recherches. Comme on le verra au chapitre suivant, son unification de l'espace et du temps était sur le point d'être considérablement approfondie. Au moment où la plupart des physiciens l'ont rattrapé et ont accepté sa théorie de la relativité restreinte, Einstein était déjà bien au-delà.

3
Le monde comme géométrie

Les premières décennies du XX^e siècle ont vu quelques tentatives d'unification. Peu d'entre elles ont réussi. En rappelant brièvement leurs histoires, nous pouvons en tirer des leçons, qui nous aideront à comprendre la crise à laquelle font face les tentatives actuelles d'unification.

De Newton à Einstein, la même idée prédominait : *le monde n'est fait que de la matière*. Même l'électricité et le magnétisme n'étaient que des aspects de la matière : juste des tensions dans l'éther. Mais cette belle image fut anéantie par le triomphe de la relativité restreinte, puisque, si les notions même de repos ou de mouvement n'ont pas de sens, alors l'éther doit *a fortiori* être une fiction.

La recherche d'une unification a dû prendre une nouvelle direction, et une seule était possible. Il fallait prendre la théorie de l'éther à l'envers : si les champs ne sont pas faits de la matière, alors peut-être les champs sont-ils eux-mêmes la substance fondamentale. Dans ce cas, *la matière est constituée de champs*. Puisque l'on possédait déjà des modèles d'électrons et d'atomes comme tensions dans les champs, le pas qui restait à franchir n'était pas si grand.

Mais alors que cette idée recueillait déjà des adhésions, il restait encore des mystères. Par exemple, il existait deux types de champs : le champ gravitationnel et le champ électromagnétique. Pourquoi ces deux champs et non pas un champ unique ? Est-ce la fin de l'histoire ? La hâte de l'unification a poussé les physiciens à se demander si la gravité et l'électromagnétisme n'étaient que des aspects différents du même phénomène. Ainsi est née la recherche de ce que nous appelons aujourd'hui la « théorie unifiée des champs ».

Puisque Einstein venait d'incorporer l'électromagnétisme dans sa théorie restreinte de la relativité, la voie la plus logique à poursuivre était de modifier la théorie de la gravitation de Newton pour qu'elle soit cohérente avec la théorie de la relativité. Cela s'est avéré facile à réaliser et, au-delà, la modification en question a mené à une nouvelle découverte formidable, qui restera jusqu'à ce jour au cœur des théories unifiées. En 1914, un physicien finlandais du nom de Gunnar Nordström a trouvé que le seul moyen d'unifier la gravité avec l'électromagnétisme était d'ajouter une nouvelle dimension à l'espace. Il a mis sur papier des équations qui décrivaient l'électromagnétisme dans un monde à quatre dimen-

sions spatiales (plus une dimension temporelle) ; la gravité s'en suivait naturellement. Au prix seulement d'une dimension spatiale supplémentaire, Nordström a réussi à unifier la gravité avec l'électromagnétisme, d'une façon qui était en parfaite cohérence avec la théorie einsteinienne de la relativité restreinte.

Mais si cette quatrième dimension existait vraiment, ne pourrions-nous pas la voir, regarder dedans exactement de la même façon que nous regardons autour de nous dans les trois dimensions spatiales habituelles ? Si ce n'est pas le cas, alors la théorie n'est-elle pas de toute évidence fausse ? Pour éviter ce problème gênant, on considère que la nouvelle dimension est un cercle, de sorte que, quand on regarde dans cette dimension, on ne fait que tourner en rond et se retrouver au même endroit[3]. On peut ensuite réduire le diamètre du cercle, de façon à rendre difficile toute tentative de percevoir l'existence de la quatrième dimension. Pour comprendre comment le rétrécissement d'une chose peut aider à la rendre invisible, rappelez-vous que la lumière est constituée d'ondes et que chaque onde lumineuse a une longueur, qui correspond à la distance entre les sommets de l'onde. La longueur d'onde de la lumière pose ainsi une limite à la taille de ce que l'on peut voir, puisqu'il est impossible d'éclairer, donc de distinguer, un objet plus petit que la longueur d'onde de la lumière. Par conséquent, on ne peut pas détecter l'existence d'une dimension supplémentaire de taille plus petite que la longueur d'onde de la lumière qu'on peut percevoir.

On est tenté de croire qu'Einstein, parmi tous les autres physiciens, aurait été le premier à applaudir la nouvelle théorie. Mais à l'époque de son invention, en 1914, Einstein était déjà embarqué dans un nouveau voyage. Contrairement à ses contemporains, il a préféré poursuivre la voie de l'unification de la gravité avec la relativité, qui l'a, à nouveau, conduit au fondement même du principe de relativité : l'unification du mouvement et du repos découvert par Galilée quelques siècles plus tôt. Dans cette dernière unification n'intervenait que le mouvement uniforme, c'est-à-dire le mouvement selon une droite, à vitesse constante. À partir de 1907 environ, Einstein a commencé à s'interroger sur les autres types de mouvements, tel le mouvement accéléré. Dans le mouvement accéléré, la direction ou la vitesse varient. Alors, n'est-il pas nécessaire de gommer de quelque façon que ce soit la distinction entre le mouvement accéléré et le mouvement uniforme ?

Au premier regard, cela paraît être un faux pas, puisqu'on ne peut pas ressentir les effets du mouvement uniforme, tandis qu'on ressent très bien les effets de l'accélération. Quand un avion décolle, nous sommes plaqués en arrière sur nos sièges. Quand un ascenseur commence à monter, on sent l'accélération, cette pression supplémentaire qui nous tire vers le sol. C'est à ce moment qu'Einstein a fait l'avancée la plus extraordinaire. Il a réalisé que *l'on ne pouvait pas distinguer les effets de l'accélération des effets de la gravité*. Imaginez une personne debout dans un ascenseur, attendant qu'il entame son mouvement. Elle sent déjà une force qui la tire vers le sol. Ce qui se passe quand l'ascenseur commence à monter, n'est pas différent en principe, mais seulement en degré : elle sent la même force augmenter. Supposez que l'ascenseur reste immobile, mais que la force gravitationnelle croisse brusquement. Einstein a compris que dans ce cas, cette personne sentirait exactement la même chose que si l'ascenseur montait subitement.

Inversement, supposez que le câble qui retient l'ascenseur soit sectionné et que la cabine, et tout le monde à l'intérieur, commence à tomber. En chute libre, les passagers de la cabine ne sentiraient plus leur poids. Ils feraient alors la même expérience de l'apesanteur que les astronautes dans l'espace. Cela signifie que l'accélération de l'ascenseur en chute libre compense totalement l'effet de la gravité.

Einstein se rappellera, plus tard, du moment où il a compris qu'une personne tombant du toit d'un immeuble ne sentirait aucun effet gravitationnel pendant sa chute. Il a appelé cette idée, « l'idée la plus heureuse de ma vie », et il en a fait un principe qu'il a baptisé « principe d'équivalence ». Ce principe dit que les effets de l'accélération ne peuvent pas être distingués des effets de la gravité[4].

Einstein a ainsi réussi à unifier tous les types de mouvement. Le mouvement uniforme est le même que le repos. Et l'accélération n'est rien d'autre que le repos, augmenté de la force gravitationnelle.

L'unification de l'accélération et de la gravitation a eu des conséquences importantes et, avant même que ses implications conceptuelles ne soient comprises, d'importantes implications expérimentales furent dégagées. Quelques prédictions découlaient tout simplement de l'algèbre qu'on apprend au lycée – par exemple, que les horloges doivent ralentir dans un champ gravitationnel. Elles ne furent vérifiées que bien plus tard. Une autre prédiction – faite pour la première fois par Einstein en 1911 – était que la lumière se courbe lorsqu'elle circule à travers un champ gravitationnel.

Remarquez qu'ici, comme dans le cas des unifications réussies dont nous avons discuté plus haut, plusieurs unifications eurent lieu au même moment. Deux types de mouvements différents furent unifiés ; il n'y avait plus aucun besoin de distinguer le mouvement uniforme du mouvement accéléré. Et dans le même temps s'opérait l'unification des effets de l'accélération et de la gravité.

Même si Einstein déduisit quelques prédictions à partir du seul principe d'équivalence, ce nouveau principe n'était pas un indice suffisant de la présence d'une théorie nouvelle. Formuler cette théorie devint son plus grand défi et il lui fallut presque dix ans pour en venir à bout. Pour comprendre pourquoi, essayons de voir ce que signifie : « La gravité courbe la lumière. »

Avant cette idée propre à Einstein, il y avait toujours eu deux types d'objets : ceux qui vivent dans l'espace, et l'espace lui-même. Nous ne sommes pas habitués à penser l'espace comme une entité avec ses propriétés et ses caractéristiques ; il l'est pourtant sans aucun doute. L'espace a trois dimensions, il a aussi une géométrie particulière telle qu'on nous l'apprend à l'école. Celle-ci s'appelle géométrie euclidienne, d'après Euclide, qui en a formulé les axiomes et les postulats il y a plus de deux millénaires. Cette géométrie euclidienne est une étude de l'espace pris en soi, l'espace comme entité. Les théorèmes de la géométrie euclidienne nous racontent ce qui advient aux triangles, aux cercles et aux droites qui se trouvent dans l'espace. Les mêmes théorèmes sont vrais pour tous les objets, qu'ils soient matériels ou imaginaires.

Une conséquence de la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell est que les rayons de la lumière se propagent selon des lignes droites. Ainsi, il n'est pas anormal d'utiliser les

rayons lumineux pour retracer la géométrie spatiale. Mais si on le fait, on s'aperçoit immédiatement que la théorie d'Einstein a des conséquences très importantes, puisque les rayons de lumière sont courbés par le champ gravitationnel qui, à son tour, réagit à la présence de la matière. La seule conclusion possible est que la présence de matière influence la géométrie de l'espace.

En géométrie euclidienne, si deux droites sont parallèles, elles ne se rencontrent jamais. Mais si deux rayons de lumière sont initialement parallèles, dans le monde réel, ils peuvent se rencontrer, car s'ils passent tous les deux près d'une étoile, ils seront recourbés l'un vers l'autre. Par conséquent, la géométrie euclidienne n'est pas adaptée au monde réel. De plus, la géométrie varie constamment, parce que la matière est constamment en mouvement. La géométrie de l'espace n'est pas plate comme un plan infini. Elle est plutôt comme la surface de l'océan : incroyablement dynamique, avec de grandes vagues et de toutes petites rides.

Ainsi, la géométrie de l'espace s'est révélé n'être qu'un autre champ. En effet, elle est presque la même chose que le champ gravitationnel. Il faut se rappeler ici l'unification partielle de l'espace et du temps qu'Einstein a accomplie dans la relativité restreinte. Dans cette dernière unification, l'espace et le temps forment, ensemble, une entité quadridimensionnelle qu'on appelle « espace-temps ». Celui-ci a une géométrie proche de la géométrie euclidienne, dans un sens que nous allons tout de suite préciser.

Considérez une ligne droite dans l'espace. Deux particules peuvent voyager le long de cette ligne. La première se déplace à vitesse uniforme, alors que la seconde accélère sans cesse. Pour ce qui concerne l'espace, les deux particules suivent le même chemin. Mais *elles suivent deux chemins différents dans l'espace-temps*. La particule à vitesse constante suit toujours une droite dans l'espace-temps, tandis que la particule en accélération suit un chemin courbe (voir figure 3).

Par conséquent, tout comme la géométrie de l'espace peut distinguer entre une droite et un chemin courbe, la géométrie de l'espace-temps peut distinguer entre une particule en mouvement à vitesse constante et une particule qui accélère.

Mais le principe einsteinien d'équivalence nous dit qu'on ne peut pas distinguer les effets de la gravité de ceux de l'accélération si les distances sont suffisamment petites[5]. Donc, puisqu'elle permet de déterminer quelles trajectoires sont accélérées et lesquelles ne le sont pas, la géométrie de l'espace-temps décrit les effets de la gravité. Par conséquent, la géométrie de l'espace-temps n'est rien d'autre que le champ gravitationnel.

Ainsi, la double unification donnée par le principe d'équivalence devient triple : tous les mouvements sont équivalents lorsqu'on tient compte des effets de la gravité, celle-ci ne pouvant pas être distinguée de l'accélération ; enfin, le champ gravitationnel est identifié à la géométrie de l'espace-temps. Une fois cette théorie développée en détail, elle est devenue la « théorie générale de la relativité » d'Einstein, publiée dans sa forme complète en 1915.

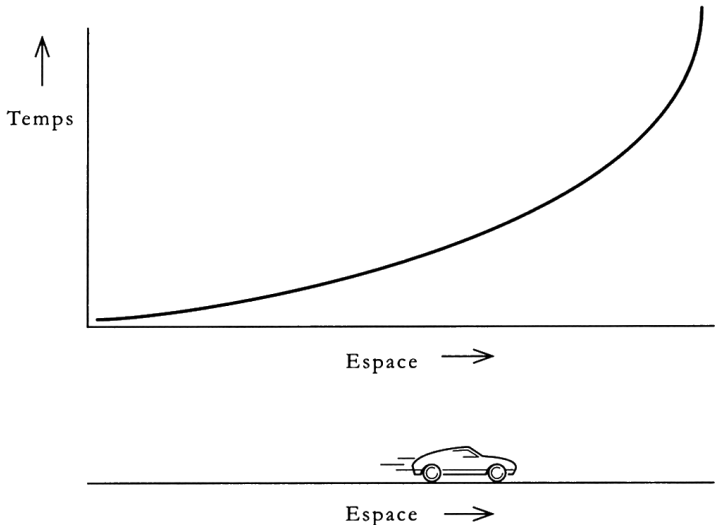


Figure 3. Une voiture décélérant sur une ligne droite de l'espace parcourt une courbe dans l'espace-temps.

Pas si mal pour quelqu'un qui, au début de sa carrière, n'a pu obtenir de poste universitaire !

En 1916, il existait deux propositions très différentes pour l'avenir de la physique, toutes les deux fondées sur l'idée d'une unification de la gravité avec le reste de la physique. D'une part, il y avait l'unification élégante de Nordström de la gravitation avec l'électromagnétisme par le simple postulat d'une dimension spatiale supplémentaire et cachée. D'autre part, il y avait la théorie de la relativité générale d'Einstein. Les deux semblaient cohérentes et chacune réalisait quelque chose d'inattendu et d'élégant. Cependant, les deux ne pouvaient pas être vraies ; il fallait choisir. Heureusement, ces deux théories faisaient des prédictions différentes pour une expérience que l'on savait réaliser. La relativité générale d'Einstein prédisait que la gravité courberait les rayons de lumière et elle donnait un chiffre exact concernant le degré de cette courbure. Dans la théorie de Nordström, cet effet ne se produisait pas : la lumière voyageait toujours tout droit.

En 1919, le très grand astrophysicien britannique Arthur Eddington mena une expédition au large de la côte ouest de l'Afrique pour faire une expérience dont le but était de confirmer, ou d'infirmer, que le champ gravitationnel du soleil courbait la lumière. Au cours d'une éclipse solaire totale, les scientifiques rassemblés observèrent de lointaines étoiles pourtant situées au-delà du soleil masqué, près de son bord. Si la gravité du soleil n'avait pas courbé leur lumière, ces étoiles n'auraient pas été visibles. Pourtant elles l'étaient. Le choix entre deux directions profondément différentes de l'unification a donc été décidé par la seule voie possible : l'expérience. C'est un exemple important, parce qu'il montre les limites de ce que la pensée peut accomplir seule. Selon certains physiciens, le cas de la relativité générale démontre que la pensée pure peut suffire à ouvrir la voie. Mais l'histoire véritable prouve le contraire. Sans expérience, la majorité des théoriciens auraient probablement choisi l'unification de Nordström, parce que celle-ci était plus simple et qu'elle apportait l'idée nouvelle et puissante d'une unification par des dimensions supplémentaires.

L'unification einsteinienne du champ gravitationnel avec la géométrie de l'espace-temps était le signal de la transformation profonde de notre façon de concevoir la nature. Avant Einstein, l'espace et le temps avaient été pensés comme possédant des caractéristiques fixes, données une fois pour toutes : la géométrie de l'espace est, a été et sera toujours celle décrite par Euclide et le temps avance indépendamment de tout le reste. Les choses pouvaient se déplacer dans l'espace et évoluer dans le temps, mais l'espace et le temps eux-mêmes ne changeraient jamais.

Pour Newton, l'espace et le temps constituaient un fond absolu. Ils formaient le théâtre permanent sur lequel se jouait la grande scène de la nature. La géométrie de l'espace et du temps était nécessaire pour donner un sens aux choses qui variaient, comme la position et la vitesse des particules. Mais eux-mêmes ne changeaient jamais. Il y a un nom particulier pour ce genre de théories, qui repose sur un cadre fixe et absolu : elles s'appellent « dépendantes du fond ».

La théorie générale de la relativité d'Einstein diffère complètement. Il n'y a plus de fond fixe. La géométrie de l'espace et du temps varie et évolue constamment, ainsi que le reste de la nature. Les différentes géométries de l'espace-temps décrivent des histoires d'univers différents. Il n'y a plus de champs qui se déplacent sur un fond géométrique fixe. Au contraire, nous avons une collection de champs, qui interagissent tous les uns avec les autres, qui sont tous dynamiques, qui tous exercent une influence sur les autres, et la géométrie de l'espace-temps en fait partie. On dit d'une telle théorie qu'elle est « indépendante du fond ». Notez bien cette distinction entre les théories dépendantes et indépendantes du fond. Nous en aurons besoin ultérieurement.

La théorie générale de la relativité d'Einstein satisfait à tous les tests de validation d'unification réussie tels que nous les avons formulés à la fin du chapitre précédent. Elle devait entraîner des conséquences conceptuelles profondes, suggérées par les unifications impliquées. Celles-ci ont vite mené aux prédictions de phénomènes nouveaux, tels que l'expansion de l'univers, le Big Bang, les ondes gravitationnelles et les trous noirs, dont il existe, pour tous, de solides preuves expérimentales. Notre notion de la cosmologie tout entière en fut bouleversée. Des propositions qui avaient jadis paru radicales, comme la courbure de la lumière par la matière, sont maintenant utilisées comme outils pour retrouver la distribution des masses dans l'univers. Et chaque fois que les prédictions de la théorie sont testées en détail, elles en sortent incontestablement victorieuses[6].

La relativité générale n'était cependant qu'un début. Même avant la publication par Einstein de la version finale de sa théorie, lui et d'autres avaient déjà commencé à formuler de nouvelles théories unifiées. Celles-ci avaient en commun une idée simple : si l'on peut comprendre la force gravitationnelle comme manifestation de la géométrie de l'espace-temps, alors pourquoi la même chose ne serait-elle pas vraie pour l'électromagnétisme ? En 1915, Einstein a écrit à David Hilbert, probablement le plus grand mathématicien de l'époque : « J'ai souvent torturé mon esprit en essayant de réduire le fossé entre la gravitation et l'électromagnétisme[7]. »

Mais ce n'est qu'en 1918 qu'émergea une idée très prometteuse concernant cette unification. Cette théorie, inventée par le mathématicien Hermann Weyl, contenait une belle

intuition mathématique, devenue plus tard le cœur même du modèle standard de la physique des particules. Néanmoins, la théorie de Weyl a échoué, parce que, dans sa version initiale, elle entraînait des conséquences importantes en désaccord avec l'expérience. Une de ces conséquences était que la longueur d'un objet devait dépendre de son parcours. Si vous prenez deux bâtons d'un mètre de long chacun, que vous les séparez, puis que de nouveau vous les rassemblez et comparez leur taille, alors généralement les deux longueurs ne seront plus les mêmes. C'est plus radical que la relativité restreinte, qui dit que les deux bâtons peuvent en effet nous paraître comme ayant des longueurs différentes, mais seulement lorsqu'ils sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, et non pas quand on les compare au repos. Il est évident qu'une telle conclusion aurait totalement contredit notre expérience de la nature.

Einstein n'a pas cru à la théorie de Weyl, mais il l'appréciait beaucoup et écrivit à son auteur : « Mis à part [le manque d'] accord avec la réalité, elle est en tout cas une superbe performance intellectuelle[8]. » La réponse de Weyl montre l'emprise de la beauté des mathématiques : « Votre rejet de la théorie, pour moi, pèse lourd... Mais mon cerveau y croit toujours[9]. »

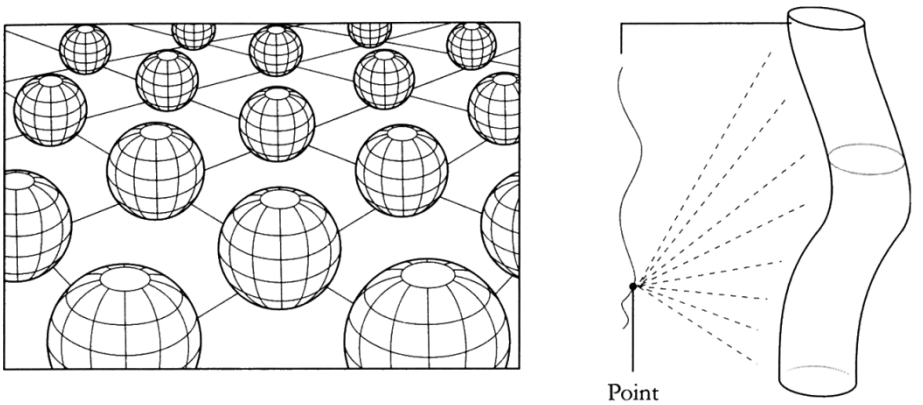
La tension entre les esprits captivés par le charme d'une belle théorie qu'ils ont inventée, et ceux plus sobres qui insistent sur le lien avec la réalité, est un problème qui resurgira dans les tentatives ultérieures d'unification. Il n'y a pas alors de solution facile à ce dilemme, parce qu'une théorie peut, en effet, être d'une grande beauté, fructueuse pour l'avancement de la science, et en même temps totalement fausse.

Malgré l'échec de sa première tentative d'unification, Weyl a inventé le concept moderne d'unification, qui nous mènera finalement à la théorie des cordes. Il fut le premier à proclamer :

> Je suis assez hardi pour croire que l'ensemble des phénomènes physiques pourraient être dérivés d'une seule et universelle loi du monde qui possède la plus grande simplicité mathématique[10].

Un an après la théorie de Weyl, le physicien allemand Theodor Kaluza découvrit une façon différente d'unifier la gravitation et l'électromagnétisme, tout en donnant un souffle nouveau à l'idée de dimension cachée de Nordström. Mais ce fut grâce à une contorsion. Si Nordström a retrouvé la gravitation en appliquant à un monde à cinq dimensions (quatre dimensions spatiales et une dimension temporelle) la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell, Kaluza fit l'inverse : il appliqua la théorie générale de la relativité d'Einstein à un monde à cinq dimensions, et retrouva l'électromagnétisme.

Il est possible d'imaginer cet espace nouveau en attachant un petit cercle à chaque point de l'espace tridimensionnel ordinaire (voir figures 4). Cette nouvelle géométrie peut se courber de plusieurs manières, puisque les petits cercles peuvent s'attacher différemment aux différents points. Par conséquent, il y a quelque chose de nouveau à mesurer depuis chaque point de l'espace tridimensionnel de départ. Il s'est trouvé que cette information nouvelle ressemble à des champs électriques et magnétiques.



Figures 4. Les dimensions supplémentaires courbées de la théorie de Kaluza-Klein.

À gauche : une sphère est placée en chaque point de l'espace usuel, tridimensionnel, pour donner un espace à cinq dimensions. À droite : un petit cercle est placé dans un espace unidimensionnel. Vu de loin, l'espace semble n'avoir qu'une dimension, mais un examen plus minutieux révèle une dimension supplémentaire.

Un autre effet formidable autant qu'inattendu de cette théorie provient du fait que la charge de l'électron est liée au diamètre du petit cercle. Et cela ne doit pas être surprenant : si le champ électrique est une manifestation de la géométrie, alors la charge électrique doit l'être aussi.

Ce n'est pas tout. La relativité générale décrit la dynamique de la géométrie de l'espace-temps en termes d'équations que l'on appelle « équations d'Einstein ». Je n'ai pas besoin de les écrire ici pour pouvoir démontrer un fait essentiel : les mêmes équations peuvent s'appliquer au monde à cinq dimensions qu'on vient d'évoquer. Tant qu'on leur impose une condition simple, elles ne sont rien d'autre que les équations correctes pour décrire les champs électrique, magnétique et gravitationnel unifiés en un seul champ. Ainsi, si la théorie est valide, le champ électromagnétique n'est qu'un autre nom pour la géométrie de la cinquième dimension.

Les idées de Kaluza ont été redécouvertes et développées dans les années 1920 par un physicien suédois, Oskar Klein. Leur théorie était si élégante qu'il était difficile de lui résister. La gravité et l'électromagnétisme étaient unifiés d'un seul coup, et les équations de Maxwell étaient expliquées comme provenant des équations d'Einstein, tout ceci en ajoutant simplement une dimension spatiale supplémentaire.

Cette fois-ci, Einstein est captivé par cette découverte. En avril 1919, il écrit à Kaluza : « d'arriver [à la théorie unifiée] par le biais d'un cylindre à cinq dimensions ne m'est jamais venue... Au premier regard, je peux dire que votre idée me plaît énormément[11]. » Quelques années plus tard, dans une lettre au physicien danois Hendrik Lorentz, Einstein se réjouissait : « Il paraît que l'union de la gravitation et de la théorie de Maxwell est réalisée de façon entièrement satisfaisante par la théorie à cinq dimensions[12]. » George Uhlenbeck, éminent physicien, se souvient de la première fois où il a eu connaissance des idées

de Klein en 1926 : « J'ai senti une sorte d'extase ! Maintenant nous pouvons comprendre le monde[13]. »

Malheureusement, Einstein et les autres avaient tort. Comme dans le cas de la théorie de Nordström, l'idée d'unification par l'ajout d'une dimension cachée a échoué et il est important de comprendre pourquoi.

J'ai déjà dit que pour qu'une unification proposée réussisse, elle doit gagner sa place en faisant des prédictions nouvelles qui seront confirmées par l'expérience. Les unifications réussies génèrent également pléthore d'avancées nouvelles, qui mènent aux découvertes futures. Bien qu'elle semblât irrésistible à certains, la théorie de Kaluza-Klein n'atteignit aucun de ces buts. La raison en est simple : la théorie imposait une condition, mentionnée plus haut : la dimension supplémentaire devait être courbée en un cercle dont le diamètre est trop petit pour qu'on puisse le voir. Mais plus encore : pour qu'on obtienne de l'électromagnétisme à partir de cette théorie, le diamètre du cercle devait être « gelé », de sorte qu'il ne varie ni dans l'espace, ni dans le temps.

C'était là le talon d'Achille de toute l'entreprise ; il provoqua son échec. En effet, si l'on gèle le diamètre de la dimension supplémentaire, cela ébranle le fondement même de la théorie générale de la relativité d'Einstein selon laquelle la géométrie est dynamique. Si l'on ajoute une dimension supplémentaire à l'espace-temps tel qu'il est décrit par la relativité générale, alors la géométrie de cette dimension supplémentaire doit, elle aussi, être dynamique. Et, en effet, elle l'aurait été si on avait permis au diamètre du petit cercle de bouger librement. Dans ce cas-là, la théorie de Kaluza et Klein aurait eu une infinité de solutions, le diamètre du cercle variant dans l'espace et dans le temps. Cela aurait pu produire des implications formidables, car cela aurait donné naissance à des processus où les forces gravitationnelle et électrique se convertissent l'une en l'autre, ainsi qu'à d'autres processus où la charge électrique varie dans le temps.

Mais si la théorie de Kaluza-Klein veut être une unification véritable, la cinquième dimension ne peut pas être traitée séparément des autres dimensions : il faut permettre au petit cercle de bouger. Les processus qui en résulteraient, seraient, par conséquent, des conséquences nécessaires de l'unification de l'électricité avec la géométrie. S'ils étaient observés, ils auraient confirmé directement que la géométrie, la gravitation, l'électricité et le magnétisme sont tous des aspects différents du même phénomène. Pourtant, malheureusement, ces effets n'ont jamais été observés.

Ce n'est pas un de ces cas où les théoriciens peuvent rapidement se féliciter des conséquences d'une unification. Au contraire, ils sont ici obligés de la cacher, en faisant en sorte qu'on n'étudie qu'une fraction infinitésimale des solutions qui correspondent au diamètre de la cinquième dimension gelée dans l'espace et dans le temps.

Cela devient encore pire lorsqu'on découvre que ces solutions sont instables. Chatouillez un tout petit peu la géométrie, et le petit cercle s'effondre vite en une singularité qui marque la fin du temps. Chatouillez-la d'une façon différente, et le cercle grandit de telle sorte que la dimension supplémentaire devient visible, tout en discréditant la théorie entière. Au résultat, les prédictions faites par la théorie doivent rester cachées pour ne pas révéler que rien ne va.

À ce point, Einstein lui-même perdit son enthousiasme. Il écrivit à son ami Paul Ehrenfest :

> Il est anormal de remplacer le continuum quadridimensionnel par celui à cinq dimensions puis immobiliser artificiellement une de ces cinq dimensions pour pouvoir tenir compte du fait qu'elle ne se manifeste pas[14].

Comme si cela n'était pas suffisant, les physiciens trouvèrent d'autres raisons pour rejeter la théorie. En 1930, ils savaient déjà qu'il existait plus de forces dans la nature que la gravité et l'électromagnétisme. Ils savaient qu'existaient également des interactions nucléaires fortes et faibles, et cela n'avait aucun sens d'entreprendre l'unification sans en tenir compte. Toutefois, personne ne savait comment on pouvait réaliser cette unification. Pourtant la recherche d'une théorie unifiée continua pendant un moment encore, Einstein en tête. Certains grands mathématiciens et physiciens de l'époque ont contribué à cet effort, y compris Wolfgang Pauli, Erwin Schrödinger et Hermann Weyl. Ils ont découvert d'autres manières de modifier la géométrie de l'espace-temps pour unifier la gravité et l'électromagnétisme. Ces autres approches reposaient sur des percées mathématiques importantes, mais tout comme les autres, elles ne menèrent nulle part ; ou bien elles ne fournissaient pas de nouvelles prédictions, ou bien elles prédisaient des phénomènes qu'on n'observait pas. Dans les années 1940, certains commencèrent à se moquer d'Einstein et des autres, ceux qui continuaient leur recherche vers la théorie unifiée des champs.

En 1979, mon premier poste après ma thèse fut à l'Institut d'études avancées de Princeton. Je l'avais accepté en partie dans l'espoir d'entrer en contact avec des disciples encore vivants d'Einstein, mort vingt-quatre ans plut tôt. Sur ce plan, je fus déçu. Il ne restait rien de son époque, sauf son buste dans la bibliothèque. Aucun étudiant ni disciple d'Einstein n'étaient là. Seules quelques personnes qui l'avaient connu, comme le physicien Freeman Dyson, étaient encore présentes.

Au cours de ma première semaine à l'Institut, Dyson – aux manières de *gentleman* – est venu me voir et m'a invité à déjeuner. Après m'avoir interrogé sur mon travail, il m'a demandé s'il y avait quelque chose qu'il pouvait faire pour que je me sente à Princeton comme chez moi. Je n'avais qu'une chose à lui demander : « Pouvez-vous me dire à quoi Einstein ressemblait vraiment ? » Dyson a répondu : « Je suis désolé, mais je ne peux pas vous aider. » Étonné, j'ai insisté : « Mais vous êtes arrivé ici en 1947 et vous étiez son collègue jusqu'à sa mort en 1955. »

Dyson m'a expliqué que, lui aussi, était venu à l'Institut dans l'espoir de connaître Einstein. Il était donc promptement allé consulter la secrétaire d'Einstein, Helen Dukas, pour demander un rendez-vous, qu'il obtint. Un jour avant la date convenue, il s'inquiéta de n'avoir pas préparé de sujet de discussion précis avec le grand homme ; il obtint alors de M^me^ Dukas des exemplaires des articles scientifiques récents d'Einstein. Il s'agissait de papiers sur ses tentatives de construire une théorie unifiée des champs. Le soir, après les avoir lus, Dyson a décidé qu'ils ne méritaient aucune attention.

Le matin suivant, il réalisa que, bien qu'il ne pût pas dire en face d'Einstein que ses papiers ne valaient rien, il pouvait encore moins ne pas lui dire. Ainsi, il ne se présenta pas

au rendez-vous et, comme il me l'a raconté, il passa les huit ans qui suivirent, jusqu'à la mort d'Einstein, à essayer de l'éviter.

Je ne pouvais répondre que par une évidence : « N'avez-vous pas pensé qu'Einstein aurait pu se défendre et vous expliquer ses motivations ? » « Bien sûr », m'a répondu Dyson. « Mais j'étais beaucoup plus vieux quand cette idée m'est venue à l'esprit. »

Un des problèmes qu'Einstein et les autres rares unificateurs ont dû affronter (les moqueries des physiciens des particules mises à part), était que ce type d'unification se révélait trop facile. Au lieu d'être difficiles à trouver, les théories unifiées des champs se sont offertes en grand nombre. Il y avait plusieurs voies différentes pour en trouver une, et aucune bonne raison de préférer l'une à l'autre. Après des décennies de travail, un seul vrai résultat fut obtenu : les deux forces nucléaires furent incluses facilement dans les théories unifiées. La seule chose à faire pour y arriver était d'ajouter encore plus de dimensions supplémentaires. Les champs nécessaires pour décrire les interactions faible et forte sont apparus lorsqu'on a ajouté quelques dimensions nouvelles à la relativité générale. L'histoire ressemble à la tentative de Kaluza avec l'électromagnétisme : il faut geler la géométrie des dimensions supplémentaires, tout en s'assurant qu'elle ne change jamais dans le temps et ne varie pas dans l'espace, et il faut aussi faire en sorte que ces dimensions soient assez petites pour ne pas être vues. Lorsque tout cela est correctement réalisé, les équations que l'on cherche à obtenir (connues sous le nom d'équations de Yang-Mills) résultent de l'application des équations de la relativité générale aux dimensions supérieures.

Le fait que les équations de Yang-Mills sont cachées dans des extensions à dimensions supérieures de la relativité générale a été découvert dans les années 1950, mais leur rôle n'a été compris que dans les années 1970, lorsqu'on a finalement pu comprendre que ces équations décrivent les interactions nucléaires forte et faible. Quand les chercheurs ont enfin établi ce pont, ils se sont risqués à quelques tentatives pour ressusciter l'idée de Kaluza-Klein, mais elles n'allèrent pas très loin. À cette époque, nous savions déjà que, dans la nature, il manquait une certaine symétrie – la parité entre gauche et droite. Plus concrètement, tous les neutrinos étaient dans ce qu'on appelle un état d'hélicité gauche, c'est-à-dire que la direction de leur rotation est toujours opposée à celle de leur moment linéaire. Cela signifie que si vous observez le monde dans un miroir, ce que vous verrez sera un monde faux, où les neutrinos sont d'hélicité droite. Par conséquent, le monde vu dans le miroir n'est pas un monde possible. Mais cette asymétrie s'est révélée difficile à expliquer dans un monde gouverné par la théorie de Kaluza-Klein.

Au-delà de tout cela, les théories à dimensions supérieures ont continué à ne pas fournir de nouvelles prédictions. Les conditions qui avaient dû être imposées concernant les dimensions supplémentaires, pour obtenir la physique voulue, étaient la graine même de la destruction des théories. En effet, plus vous ajoutez de dimensions, plus le prix que vous devez payer pour geler leur géométrie est élevé. Plus de dimensions donc plus de degrés de liberté, et, par conséquent, davantage de liberté laissée à la géométrie des dimensions supplémentaires pour pouvoir vagabonder bien loin de la géométrie rigide, nécessaire pour la reproduction des forces connues dans notre monde tridimensionnel. Le problème de l'instabilité devient, lui aussi, de plus en plus grave.

De plus, chaque fois qu'il y a plus d'une dimension supplémentaire, il y a plusieurs façons de la courber. Sur un cercle, il existe une infinité de façons de courber les dimensions supérieures et, par conséquent, une infinité de versions différentes de la théorie. Comment la nature est-elle censée choisir entre elles ?

Encore et encore, dans les premières tentatives d'unifier la physique à travers les dimensions supplémentaires se retrouve le même problème. Il y a quelques solutions qui conduisent au monde que nous observons, mais ce ne sont que des îlots instables dans un vaste univers de solutions possibles, dont le reste ne ressemble absolument pas à notre monde. Et dès que des conditions sont posées pour éliminer celles-ci, il n'y a plus d'indices flagrants de l'unification, qui n'auraient pas encore été perçus, mais qui pourraient l'être si les expérimentateurs voulaient bien les chercher. Finalement, il n'y a rien à célébrer et beaucoup à cacher.

Mais il existait un problème encore plus fondamental, qui concernait la relation entre les théories unifiées et la théorie quantique. Les premières tentatives de construction d'une théorie unifiée avaient eu lieu bien avant la formulation complète de la théorie quantique, en 1926. En effet, quelques adeptes de la théorie quantique ont même avancé des spéculations intéressantes sur la relation entre les dimensions supplémentaires et la théorie quantique. Mais dès 1930 environ, il y eut une rupture. La majorité des physiciens ont abandonné le problème de l'unification et se sont concentrés sur les applications de la théorie quantique à un large spectre de phénomènes, allant des propriétés des matériaux jusqu'aux processus utilisés par les étoiles pour produire l'énergie. Dans le même temps, les rares physiciens qui ont poursuivi la recherche de la théorie unifiée ignoraient les progrès réalisés en théorie quantique. Ces physiciens, y compris Einstein, continuaient à travailler comme si Planck, Bohr, Heisenberg et Schrödinger n'avaient jamais existé. Ils vivaient après la révolution quantique, mais prétendaient travailler dans un univers intellectuel pour lequel cette révolution n'avait pas eu lieu. Ils ressemblaient, au regard de leurs contemporains, aux communautés d'émigrés aristocrates russes qui, dans les années 1920 et 1930, organisaient des rituels sociaux élaborés à Paris et à New York, comme s'ils étaient à Saint-Pétersbourg au temps des tsars.

Certes, Einstein n'était pas un de ses intellectuels finis, émigrés d'un monde perdu (même s'il *était* un intellectuel émigré d'un monde perdu). Il savait très bien qu'il ignorait la théorie quantique, mais il avait ses raisons : il n'y croyait pas. Même s'il a lui-même illuminé la révolution quantique en montrant que le photon était réel, il en a rejeté le résultat. Il gardait l'espoir de trouver une théorie plus profonde des phénomènes quantiques, qui lui serait acceptable. Et c'est exactement à cela qu'il aspirait dans sa recherche de la théorie unifiée.

Cependant rien ne s'est produit. Le rêve d'Einstein de court-circuiter la théorie quantique a échoué, et son rêve est plus ou moins mort avec lui. À cette époque, ils étaient peu nombreux ceux qui avaient encore du respect pour lui ; et encore moins nombreux ceux qui le suivaient. Les physiciens d'alors pensaient qu'ils avaient autre chose à faire que de jouer avec une poignée d'idées fantaisistes sur l'unification. Ils œuvraient jour et nuit à cataloguer les nouvelles particules découvertes en grand nombre, et à aiguiser des théories

concernant deux nouvelles forces fondamentales. Que quelqu'un puisse encore spéculer sur un monde à plus de trois dimensions, courbées de telle façon qu'on ne puisse pas les voir, leur paraissait aussi fou et contre-productif que d'étudier les OVNI. Une telle chose n'avait pas d'implications expérimentales et n'engendrait pas de prédictions nouvelles. À une époque où la théorie se développait en contact direct avec l'expérimentation, il n'y avait aucune raison d'y prêter attention.

Mais supposez un instant que, malgré tous les obstacles, nous voulions toujours prendre au sérieux l'idée d'une théorie unifiée. Cette théorie pourrait-elle être formulée dans le langage de la théorie quantique ? La réponse serait, sans hésitation, non. Personne ne savait à l'époque comme concilier la relativité générale avec la théorie quantique. Toutes les tentatives antérieures pour y parvenir avaient échoué. Quand on ajoutait des dimensions nouvelles ou que l'on tordait la géométrie, les choses empiraient au lieu de s'améliorer. Plus grand était le nombre de dimensions, plus rapidement les équations échappaient à tout contrôle en générant des quantités infinies et des incohérences.

Finalement, bien qu'une idée d'unification faisant appel à des dimensions supérieures ait gardé un certain charme, elle fut abandonnée, et pour une bonne raison : elle n'a donné aucune prédiction testable. Même si cette théorie avait des solutions propres pour décrire notre monde, il en fut, comme nous l'avons vu, beaucoup plus qui ne le décrivaient pas. De plus, ces quelques solutions qui correspondaient à notre monde étaient instables et pouvaient facilement évoluer vers des singularités ou des mondes qui ne ressemblaient plus au nôtre. Enfin, il était impossible de les concilier avec la théorie quantique. Notez bien toutes ces raisons – parce que, à nouveau, la réussite ou l'échec de nouvelles propositions pour l'unification, telles que la théorie des cordes, dépendent de leur capacité à résoudre le même genre de problème.

Lorsque j'ai commencé mes études de physique au début des années 1970, l'idée d'unifier la gravité avec les autres forces était aussi morte que l'idée de la matière continue. C'était une bonne leçon sur la bêtise dont sont capables les savants qui, jadis, comptaient parmi les plus grands. Ernst Mach ne croyait pas aux atomes, James Clerk Maxwell croyait en l'éther, et Albert Einstein cherchait la théorie unifiée des champs. La vie est dure.

4
L'unification devient science

Après l'échec de l'unification des quatre forces fondamentales grâce à l'invention de dimensions nouvelles, la majorité des physiciens théoriciens a renoncé à l'idée de mettre la gravité en relation avec les autres forces ; une décision qui n'est pas insensée, puisque la force gravitationnelle est vraiment beaucoup plus faible que les trois autres. Leur attention était, en revanche, attirée par le véritable jardin zoologique que constituaient les particules élémentaires découvertes par les expérimentateurs dans leurs accélérateurs de particules. Ils cherchaient des données correspondant à de nouveaux principes, qui pourraient au moins unifier les différents types de particules.

Ignorer la gravité était un pas en arrière, revenir à la compréhension de l'espace et du temps d'avant la théorie générale de la relativité d'Einstein. À terme, c'était une procédure dangereuse, puisqu'elle signifiait qu'on travaillait sur des idées qui appartenaient déjà au passé. Mais il y avait aussi un avantage, à savoir que cette approche simplifiait notablement le problème. La leçon principale de la relativité générale était qu'il n'y avait pas de géométrie fixe du fond spatio-temporel. Ignorer cette donne signifiait que l'on pouvait tout simplement sélectionner un fond. Cela renvoyait les physiciens au point de vue newtonien, dans lequel les particules et les champs habitent un fond spatio-temporel fixe – un fond dont les caractéristiques sont fixées une fois pour toutes. Ainsi, les théories qui ont été développées en ignorant la gravité sont dépendantes du fond.

Pourtant, il n'était pas nécessaire de revenir à l'époque de Newton. Il était possible de travailler dans le cadre spatio-temporel proposé par la théorie restreinte de la relativité qu'Einstein avait élaborée en 1905. Selon cette théorie, la géométrie de l'espace est celle d'Euclide, que beaucoup d'entre nous ont étudié au lycée ; pourtant, l'espace est mélangé avec le temps, afin de s'accorder aux deux postulats d'Einstein : la relativité des observateurs et la vitesse constante de la lumière. La théorie ne pouvait pas inclure la gravité, mais elle a su donner le cadre adéquat pour la théorie des champs électrique et magnétique de Maxwell.

Une fois la mécanique quantique complètement formulée, les théoriciens quantiques se sont tournés vers l'unification de l'électromagnétisme avec la théorie quantique. Puisque les phénomènes de base de l'électromagnétisme sont des champs, l'unification qui éven-

tuellement en résulterait fut appelée « théorie quantique des champs ». Et puisque la théorie restreinte de relativité d'Einstein était le cadre approprié pour l'électromagnétisme, ces théories pouvaient aussi être vues comme l'unification de la théorie quantique avec la relativité restreinte.

C'était là un défi beaucoup plus grand que d'appliquer la mécanique quantique aux particules, parce que le champ a une valeur à chaque point de l'espace. Si l'on suppose que l'espace est continu, alors il existe une infinité continue de variables. En théorie quantique, chaque variable est assujettie au principe d'incertitude. Une implication sera alors que plus on essaye d'être précis dans la mesure d'une variable, plus celle-ci fluctue de façon incontrôlée. Un nombre infini de variables qui, toutes, fluctuent de façon incontrôlée, pourrait facilement devenir ingérable. Lorsqu'on interroge la théorie, on doit être très vigilant et ne pas en tirer de réponses infinies ou incohérentes.

Les théoriciens quantiques savaient déjà que, pour toute onde électromagnétique, il y existe une particule quantique, le *photon*. Il ne leur a fallu que quelques années pour développer tout ceci en détail, mais le résultat n'a donné qu'une théorie des photons en mouvement libre ; le pas suivant fut alors d'inclure les particules chargées, comme les électrons et les protons, et de décrire comment celles-ci interagissaient avec les photons. Le but ultime de cet exercice était d'établir une théorie parfaitement cohérente de l'électrodynamique quantique, ou EDQ. Mais le vrai défi s'est révélé beaucoup plus important. Le problème de l'EDQ fut résolu une première fois par le physicien japonais Sin-Itiro Tomonaga au cours de la Seconde Guerre mondiale. Pourtant, la nouvelle n'a été connue du reste du monde qu'autour de 1948. En attendant, l'EDQ aura été construite deux fois encore, chaque fois indépendamment des autres, par deux jeunes Américains : Richard Feynman et Julian Schwinger.

Une fois l'EDQ acceptée, il a fallu étendre la théorie quantique des champs aux interactions nucléaires faible et forte. Cela prit encore un quart de siècle, et permit la découverte de deux nouveaux principes. Le premier a défini ce qu'il y avait en commun entre l'électromagnétisme et les interactions nucléaires. Il s'appelle « principe de jauge », et, comme je l'évoquerai plus loin, il mène à l'unification des trois forces. Le second principe explique pourquoi, bien qu'unifiées, les trois forces sont si différentes. Il s'appelle « brisure spontanée de symétrie ». Ces deux principes forment ensemble la pierre angulaire du modèle standard de la physique des particules. Leur application précise a pourtant dû attendre la découverte du fait que les particules comme le proton et le neutron ne sont pas, en fin de compte, élémentaires ; au contraire, elles sont constituées de quarks.

En effet, le proton et le neutron sont constitués, chacun, de trois quarks, tandis que d'autres particules que l'on appelle *mésons*, en ont deux (ou plus correctement, un quark et un antiquark). Cette découverte fut faite au début des années 1960, de façon indépendante, par Murray Gell-Mann à Caltech et par George Zweig au CERN à Genève. Peu de temps après, James Bjorken, qui travaillait à Stanford au Centre de l'accélérateur linéaire (SLAC), et Richard Feynman à Caltech ont proposé des expériences qui, quand elles étaient réellement menées par la suite au SLAC, ont confirmé que le proton et le neutron sont chacun, en effet, constitués de trois quarks.

La découverte des quarks a permis de franchir un pas essentiel vers l'unification, car l'interaction entre protons, neutrons et autres particules était extrêmement compliquée. On nourrissait ainsi l'espoir que la force entre les quarks pourrait elle-même être simple et que les complications que l'on observait n'apparaissaient qu'en raison de la nature composite des protons et des neutrons. Ce genre de notions avait été validé auparavant : alors que les forces agissant entre les molécules sont complexes, les forces entre les atomes qui les composent peuvent être aisément comprises en termes électromagnétiques. Il fallait donc renoncer à comprendre la force liant protons et neutrons en termes fondamentaux et, en contrepartie, se demander comment cette force affectait les quarks. Le réductionnisme était ici au travail – le vieux truc selon lequel les lois qui régissent les parties sont souvent plus simples que celles qui régissent le tout – et il a finalement abouti à la découverte de la similitude entre les deux interactions nucléaires, faible et forte, et l'électromagnétisme. Ces trois forces devinrent des conséquences du principe de jauge, simple mais puissant.

On peut mieux comprendre le principe de jauge en termes de ce que les physiciens appellent « symétrie ». Pour faire simple, la symétrie est une opération qui ne change pas le comportement de la chose par rapport au monde extérieur. Par exemple, si on fait tourner un ballon, on ne le change pas ; il reste toujours une sphère. Lorsque les physiciens parlent de symétrie, ils peuvent se référer soit à une opération dans l'espace, comme une rotation, qui ne change pas les résultats de l'expérience, soit à n'importe quel autre changement que l'on fait dans une expérience, sans changer son issue. Imaginez que vous preniez deux groupes de chats – disons, les chats qui habitent à l'Est et les chats qui habitent à l'Ouest – et que vous testiez leurs aptitudes à sauter. S'il n'y pas de différence dans le saut moyen d'un chat, alors vous diriez que les sauts des chats sont symétriques sous l'opération de déplacement de tous les chats occidentaux vers l'est et de tous les chats orientaux vers l'ouest.

Voici un autre exemple, simplifié, pour mieux comprendre. Considérez une expérience où un faisceau de protons est accéléré puis dirigé vers un but constitué de certains types de noyaux. En tant qu'expérimentateur, vous observez les figures que font les protons lorsqu'ils se diffusent sur les noyaux qui constituent le but. L'instant d'après, sans changer d'énergie ni de but, vous substituez des neutrons aux protons. Dans certains cas, les figures de la dispersion ne changent pratiquement pas. On dira que l'expérience a révélé que les forces impliquées agissent de la même manière sur les protons et sur les neutrons. En d'autres termes, l'acte de remplacer les protons par les neutrons est une symétrie des forces entre ces deux types de particules et les noyaux qui constituent le but.

Connaître les symétries est une bonne chose, parce qu'elles disent quelque chose d'important sur les forces en jeu. Dans le premier exemple, nous avons appris que la force de gravité qui s'exerce sur les chats ne dépend pas des points cardinaux d'où ils sont issus. Dans le second exemple, nous avons appris que certaines forces nucléaires ne savent pas faire la distinction entre un proton et un neutron. Parfois, la seule leçon valable que l'on peut tirer d'une symétrie est cette information partielle sur les forces. Mais il existe des situations particulières où les symétries déterminent entièrement les forces. C'est le cas pour une catégorie de forces qu'on appelle « forces de jauge ». Je ne vous ennuierai pas en

vous expliquant comment tout ceci fonctionne exactement, puisque vous n'aurez pas besoin de le savoir[15], mais le fait que toutes les propriétés d'une force peuvent être déterminées par la connaissance des symétries est une des découvertes les plus importantes de la physique du XX^e siècle. C'est cette idée que l'on entend sous les termes « principe de jauge[16] ».

Il y a deux choses qu'il faut savoir à propos du principe de jauge. La première est que les forces auxquelles il aboutit sont portées par les particules qui s'appellent « bosons de jauge ». La seconde est que les forces électromagnétiques, nucléaire faible et nucléaire forte, se trouvèrent être chacune de ce type. Les bosons de jauge qui correspondent à la force électromagnétique s'appellent photons. Ceux qui correspondent aux interactions fortes, qui tiennent ensemble les quarks, s'appellent *gluons*. Ceux qui correspondent aux interactions faibles ont un nom moins intéressant : ils s'appellent, tout simplement, « bosons faibles ».

Le principe de jauge n'est rien d'autre que « la belle idée mathématique » dont il était question au chapitre 3, découverte en 1918 par Hermann Weyl dans sa tentative ratée d'unification de la gravité avec l'électromagnétisme. Weyl est un des mathématiciens qui a le plus profondément réfléchi sur les équations de la physique, et qui a compris que la structure de la théorie de Maxwell était entièrement expliquée par une force de jauge. Dans les années 1950, quelques personnes se demandèrent si les autres théories des champs pouvaient être construites en utilisant le principe de jauge. Cela s'est avéré possible à condition que ces théories soient fondées sur des symétries entre les différents types de particules élémentaires. On appelle aujourd'hui ces théories « théories de Yang-Mills », d'après les noms de deux de leurs inventeurs[17]. Au début, personne ne savait que faire de ces nouvelles théories. Les nouvelles forces qu'elles décrivaient avaient une portée infinie, comme l'électromagnétisme. Les physiciens savaient que les deux forces nucléaires avaient une portée courte, et il leur a donc semblé que celles-ci ne pouvaient pas être décrites par la théorie de jauge.

Ce qui fait de la physique théorique un art aussi bien qu'une science, c'est que les meilleurs théoriciens ont un sixième sens qui leur dit quels résultats il faut ignorer. Ainsi, au début des années 1960, Sheldon Glashow, à l'époque post-doc à l'Institut Niels-Bohr, suggéra que la force faible était bien décrite par la théorie de jauge. Il a simplement postulé qu'un mécanisme inconnu limitait la portée de la force faible. Si ce problème de la portée pouvait être résolu, alors la force faible pouvait être unifiée avec l'électromagnétisme. Mais, globalement, un problème majeur demeurait : comment peut-on unifier les forces qui se manifestent de façons aussi différentes que l'électromagnétisme et les interactions faible et forte ?

C'est un exemple du problème général qui se pose devant toute tentative d'unification. Les phénomènes que l'on souhaite unifier sont différents ; autrement, il n'y aurait rien d'étonnant dans leur unification. Par conséquent, même si l'on découvre une certaine unité cachée, il faut encore comprendre pourquoi et comment il est possible qu'ils nous paraissent si différents.

Comme nous l'avons vu, Einstein avait une méthode formidable pour résoudre ce problème dans le cas des relativités restreinte et générale. Il avait compris que les différences

apparentes entre les phénomènes n'étaient pas propres à ces phénomènes, mais venaient entièrement de la nécessité de les décrire du point de vue d'un observateur. L'électricité et le magnétisme, le mouvement et le repos, la gravité et l'accélération furent tous unifiés par Einstein selon cette méthode. Par conséquent, les différences que les observateurs perçoivent entre ces paires de concepts ne sont que contingentes, car elles ne correspondent qu'aux points de vue d'observateurs différents.

Dans les années 1960, une autre solution fut proposée : les différences entre les phénomènes unifiés sont bien contingentes, mais pas à cause des points de vue des observateurs particuliers. En effet, les physiciens ont fait une observation qui, à première vue, paraît élémentaire : les lois peuvent avoir une symétrie qui n'est pas respectée par toutes les choses du monde auxquelles elles s'appliquent.

Je vais d'abord illustrer ce point dans le cas de nos lois sociales. Celles-ci s'appliquent de façon équivalente à toute personne. On peut traiter ce fait en tant que symétrie des lois. Remplacez une personne par une autre : elles obéissent aux mêmes lois. Tout le monde doit payer les impôts ou ne pas dépasser la limitation de vitesse sur la route. Mais cette équivalence, ou symétrie devant la loi, n'a pas besoin et ne demande pas que nos circonstances de vie soient les mêmes pour tous. Certains parmi nous sont plus riches que les autres. Nous ne possédons pas tous une voiture, et parmi ceux qui en ont au moins une, la tendance à excéder la limitation de vitesse ne se manifeste pas de la même façon.

De plus, dans une société idéale, nous devrions tous commencer notre vie avec des possibilités égales. Malheureusement, dans la réalité, ce n'est pas le cas ; si cela l'était, nous aurions pu parler d'une symétrie des chances initiales. Lorsque la vie avance, cette symétrie initiale disparaît. Lorsque nous avons vingt ans, nos possibilités sont déjà très différentes. Par exemple, seulement très peu de gens ont encore la possibilité d'être pianiste professionnel ou athlète aux Jeux olympiques.

On peut décrire cette différenciation en disant que l'égalité initiale est brisée lorsque le temps avance. Les physiciens, qui parlent de l'égalité sous le nom de symétrie, diraient que la symétrie, qui existe entre nous à la naissance, est brisée par les situations que nous rencontrons dans la vie et les choix que nous faisons. Dans certains cas, il serait difficile de prédire la voie dans laquelle la symétrie sera brisée.

On sait qu'elle doit l'être, mais en regardant une crèche pleine de bébés, on ne sait pas prévoir comment. Dans ce cas-là, les physiciens diraient que la symétrie est brisée *spontanément*. Par cette notion, on entend qu'il est nécessaire que la symétrie se brise à un moment, mais que la façon précise dont elle le sera est hautement contingente. Cette brisure spontanée de symétrie est le second grand principe sous-jacent au modèle standard de la physique des particules.

Voici un autre exemple tiré de la vie humaine. En tant que professeur à l'université, je me suis rendu de temps en temps à des réceptions avec les nouveaux étudiants. En les regardant se croiser pour la première fois, il m'est venu à l'esprit qu'un an plus tard, certains deviendraient amis, d'autres amants, et quelques-uns pourraient même se marier. À cette première rencontre, lorsqu'ils sont encore étrangers les uns aux autres, il y a beaucoup de symétrie dans la salle : plusieurs couples potentiels et plusieurs amitiés potentielles. Mais la

symétrie sera nécessairement brisée, au fur et à mesure que des vraies relations humaines s'établiront à partir du cadre beaucoup plus large des relations potentielles. C'est aussi un exemple de brisure spontanée de symétrie.

Une grande partie de la structure du monde, à la fois social et physique, est une conséquence de la nécessité pour le monde, dans son actualité, de briser les symétries présentes dans l'espace des possibles. Un trait important de cette nécessité est la compensation mutuelle entre la symétrie et la stabilité. La situation symétrique où nous sommes tous potentiellement amis et partenaires romantiques est instable. En réalité, on doit toujours faire des choix, et cela mène à plus de stabilité. On échange la liberté instable des potentialités pour l'expérience stable de l'actualité.

La même chose est vraie en physique. Un exemple physique commun est celui d'un crayon qui balance sur sa pointe. Il est symétrique en ce que pendant que le crayon balance sur sa pointe, toute direction est aussi bonne qu'une autre. Mais il est instable : quand le crayon tombe, comme il le fera inévitablement, il tombera au hasard dans une direction ou une autre, brisant la symétrie. Une fois tombé, le crayon est stable, mais il ne manifeste plus sa symétrie, bien que la symétrie soit toujours là dans les lois sous-jacentes. Les lois décrivent seulement l'espace de ce qui peut potentiellement advenir ; le monde actuel, régit par ces lois, inclut le choix d'une seule potentialité parmi toutes celles qui sont offertes.

Ce mécanisme de brisure spontanée de symétrie peut s'appliquer aux particules dans la nature. Lorsqu'il s'applique aux symétries dont, par le principe de jauge, résultent les forces de la nature, il permet de différencier les caractéristiques de ces forces. On peut maintenant distinguer les forces : celles-ci peuvent avoir des portées et des puissances différentes. Avant que la symétrie soit brisée, les quatre forces fondamentales ont une portée infinie, comme l'électromagnétisme, mais après la brisure, certaines auront une portée finie, comme les forces des deux interactions nucléaires. Comme je l'ai déjà dit, c'est une des découvertes les plus importantes de la physique du XX^{e} siècle, parce qu'avec le principe de jauge, elle permet d'unifier des forces fondamentales qui, sans cela, seraient restées disparates.

L'idée de combiner la brisure spontanée de symétrie avec le principe de jauge a été inventée par François Englert et Robert Brout à Bruxelles en 1962 et, indépendamment d'eux, quelques mois plus tard par Peter Higgs de l'Université d'Édimbourg. Ce phénomène devrait s'appeler le phénomène EBH, mais, malheureusement, il est plus souvent appelé « phénomène de Higgs ». (C'est un des nombreux cas où une découverte scientifique porte le nom de celui qui a été le dernier, et non pas le premier, à la révéler.) Ces trois chercheurs ont aussi montré qu'il existe une particule dont l'existence est une conséquence de la brisure spontanée de symétrie. Cette particule s'appelle « boson de Higgs ».

Quelques années plus tard, en 1967, Steven Weinberg et le physicien pakistanais Abdus Salam ont indépendamment découvert que la combinaison du principe de jauge et de la brisure spontanée de symétrie pourrait être utilisée pour construire une théorie bien précise, qui unifierait la force électromagnétique et celle des interactions nucléaires faibles. La théorie porte leur nom : le modèle de Weinberg-Salam de la « force électrofaible ». C'est

sans doute une des unifications dont on doit célébrer les conséquences ; très vite, elle a mené aux prédictions de nouveaux phénomènes, qui ont successivement été vérifiés. Elle implique, par exemple, qu'il doit y avoir des particules analogues au photon portant la force électromagnétique, mais qui, elles, porteraient les interactions faibles. Il en existe trois qu'on appelle W^+, W^- et Z. Toutes les trois ont été enregistrées, et leurs propriétés sont conformes aux prédictions.

L'utilisation de la brisure spontanée de symétrie dans la théorie fondamentale a eu des conséquences essentielles non seulement sur les lois de la nature, mais aussi sur la question plus globale de ce qu'est la nature. Avant cette époque, on croyait que les caractéristiques des particules élémentaires étaient déterminées directement par les lois éternelles et immuables de la nature. Avec la théorie de la brisure spontanée de symétrie, un nouvel élément voit le jour : les caractéristiques des particules élémentaires dépendent en partie de l'histoire et de l'environnement. La symétrie peut être brisée, ceci de diverses façons en fonction de conditions comme la densité ou la température. Plus généralement, les caractéristiques des particules élémentaires dépendent non seulement des équations de la théorie, mais aussi de la solution précise de ces équations qui s'applique à notre univers. C'est le signe d'une exception au réductionnisme habituel, selon lequel les caractéristiques des particules élémentaires sont éternelles et définies par la loi absolue. Cette situation inaugure la possibilité que plusieurs ou même toutes les caractéristiques des particules élémentaires soient contingentes et dépendent de la solution des équations qui est sélectionnée dans notre région de l'univers ou à l'ère particulière où nous vivons. Elles pourraient être différentes dans des régions différentes[18]. Elles pourraient même évoluer dans le temps.

Dans la brisure spontanée de symétrie, il y a une quantité physique dont la valeur est le signe que la symétrie est brisée, et comment elle le fut. Cette quantité est généralement un champ que l'on appelle « champ de Higgs ». Le modèle de Weinberg-Salam demande que ce champ de Higgs existe et qu'il se manifeste en tant que nouvelle particule que l'on appelle « boson de Higgs », qui porte la force associée au champ de Higgs. De toutes les prédictions faites par l'unification des forces électromagnétique et faible, seule celle-ci n'est pas encore vérifiée. Une des difficultés est que la théorie ne permet pas de prédire avec précision la masse du boson de Higgs ; c'est une de ces constantes libres dont la théorie nous demande de choisir la valeur. Beaucoup d'expériences ont été réalisées pour trouver le boson de Higgs, mais tout ce que nous savons est que s'il existe, sa masse doit alors être supérieure à la masse du proton au moins par un facteur 120. L'un des principaux objectifs des accélérateurs futurs est de trouver le boson de Higgs.

Au début des années 1970, le principe de jauge fut appliqué aux interactions nucléaires fortes qui relient les quarks, et on a découvert que le champ de jauge est aussi responsable de ces interactions. La théorie qui résulta s'appelle « chromodynamique quantique », ou CDQ. (Le mot *chromo*, du grec, pour « couleur », se réfère à un extravagant jeu terminologique venant du fait que les quarks existent en trois versions différentes que l'on appelle, à titre de plaisanterie, « couleurs ».) Elle aussi a survécu à un test expérimental rigoureux. Avec le modèle de Weinberg-Salam, elle est au cœur du modèle standard de la physique des particules élémentaires.

Ce résultat – que les trois forces ne sont que l'expression d'un seul principe unificateur, le principe de jauge – est le plus intéressant de la physique théorique jusqu'à aujourd'hui. Les physiciens qui ont démontré ce résultat sont de véritables héros de la science. Le modèle standard est le fruit de décennies de travail théorique et expérimental très difficile, souvent frustrant, mené par des centaines de scientifiques. Il fut achevé en 1973 et, pendant trente ans, il a su résister à un grand nombre de tests expérimentaux. Nous, les physiciens, en sommes légitimement fiers.

Considérons cependant ce qui s'est passé par la suite. Les trois forces étaient désormais comprises en tant qu'expressions du même principe, et il était évident qu'elles devaient être unifiées. Pour unifier toutes les particules, il nous fallait une grande symétrie susceptible de les réunir. Une fois cette symétrie dégagée, on applique le principe de jauge qui donne naissance aux trois forces. Afin de distinguer entre les particules et les forces, on ajuste la théorie de telle sorte que toute configuration du système, où la grande symétrie se trouve réalisée, est instable, tandis que les configurations stables sont celles qui sont asymétriques. Cela n'est pas difficile, puisque, comme je l'ai dit, les situations symétriques sont souvent instables dans la nature. Ainsi, une symétrie qui inclut toutes les particules sera spontanément brisée. On peut s'arranger pour que cette brisure de symétrie nous fournisse trois forces avec des caractéristiques qui correspondent à celles qu'on observe.

L'idée qui présidait à la grande unification était non seulement de mettre ensemble toutes les forces, mais aussi d'inventer une symétrie qui pourrait transformer les quarks (les particules régies par les interactions fortes) en leptons (les particules régies par les interactions électrofaibles) et, par conséquent, d'unifier deux principaux types de particules, en en faisant un seul type de particules et un seul champ de jauge. Le candidat le plus simple pour cette grande unification était connu sous le nom de symétrie SU(5). Ce nom est un code pour les cinq types de particules qui entrent en jeu dans la symétrie : les trois quarks colorés de chaque type et deux leptons (l'électron et son neutrino). Non seulement SU(5) unifiait les quarks et les leptons, mais en le faisant, il manifestait une rare élégance, puisqu'il expliquait précisément tout ce qui entrait dans le modèle standard et il rendait nécessaire ce qui jusque-là paraissait accidentel. SU(5) a expliqué toutes les prédictions du modèle standard et, même mieux, il a fait des prédictions nouvelles.

Ainsi, il prédisait entre autres l'existence de processus au cours desquels les quarks se transformaient en électrons et en neutrinos, car dans SU(5) les quarks, les électrons et les neutrinos ne sont que des manifestations différentes du même type sous-jacent de particules. Comme nous l'avons vu, lorsque deux choses sont unifiées, on doit pouvoir observer des processus liés aux différentes transformations de l'une en l'autre. En effet, SU(5) a prédit un tel processus, similaire à la décomposition radioactive. C'est une prédiction formidable, qui possède toutes les caractéristiques de la grande unification. La théorie la requiert, et elle en découle de manière unique.

La décomposition du quark en électrons et neutrinos a des conséquences visibles. Un proton contenant ce quark n'est plus un proton ; il se décompose en particules plus simples. Ainsi, les protons ne seraient plus des particules stables – ils seraient assujettis à une espèce de décomposition radioactive. Évidemment, si cela se produisait très fréquemment,

notre monde se serait décomposé, puisque tout ce qu'il y a de stable dans notre monde est fait de protons. Par conséquent, si les protons se décomposent, la fréquence de cette décomposition doit en être très faible. Et c'est exactement ce que la théorie a prédit : le taux est de moins d'une seule décomposition de ce genre en 10^{11} ans.

Bien que cet effet soit extrêmement rare, il est réalisable expérimentalement, puisque le nombre de protons dans le monde est énorme. Par conséquent, avec SU(5) nous avions la théorie unifiée de meilleure qualité : celle où l'on trouve une conséquence surprenante qui ne contredit pas les observations et qui peut être confirmée expérimentalement. Nous pouvions compenser l'extrême rareté de la décomposition des protons en construisant un énorme réservoir rempli d'eau extra-pure, dans l'espoir que quelque part dans ce réservoir, un proton se décomposerait aussi souvent que quelques fois par an. Il faut protéger le réservoir des rayons cosmiques, parce que ces rayons, qui bombardent la terre sans cesse, peuvent casser les protons. Après cela, puisque la décomposition des protons produit beaucoup d'énergie, tout ce qu'il reste à faire est d'entourer le réservoir de détecteurs et d'attendre. Des fonds ont été attribués à ce projet, et de grands réservoirs ont été construits dans des mines, bien loin de la surface de la terre. Le monde scientifique attendait les résultats avec impatience.

Vingt-cinq ans plus tard, il les attend toujours. Aucun proton ne s'est décomposé. Nous avons ainsi attendu déjà assez longtemps pour nous assurer que la grande unification SU(5) est fausse. C'est une belle idée, mais une de celles que la nature n'a pas voulu réaliser.

Récemment, j'ai rencontré par hasard un ami avec qui j'étais en thèse : Edward Farhi, devenu maintenant directeur du Centre de physique théorique au MIT. Vingt ans étaient probablement passés depuis que nous avions eu notre dernière conversation sérieuse, mais nous avons rapidement trouvé beaucoup de sujets de discussion. Nous avons tous les deux réfléchi à ce qui a vu le jour, et à ce qui n'a pas vu le jour, en physique des particules au cours des vingt-cinq ans passés depuis nos thèses. Eddie a donné des contributions importantes à la théorie des particules, mais maintenant il travaille en grande partie dans un domaine en pleine expansion, celui des ordinateurs quantiques. Je lui ai demandé pourquoi, et il m'a répondu qu'avec les ordinateurs quantiques, contrairement à la physique des particules, on sait quels sont les principes, on peut en développer les implications, et on peut faire les expériences pour tester les prédictions qui ont été faites. Eddie et moi, nous nous sommes retrouvés en train de réfléchir au moment même où la physique des particules a cessé d'être un domaine en pleine expansion et qui nous avait tant excités pendant nos années de thèse. Nous avons tous les deux conclu que le point décisif avait été la découverte que les protons ne se décomposent pas dans le laps de temps prédit par la grande théorie unifiée SU(5). « J'étais prêt à parier sur ma vie – enfin, peut-être pas ma vie, mais tu vois ce que je veux dire – que les protons se décomposent », m'a-t-il dit. « SU(5) était une théorie si belle, tout y avait trouvé sa place – et puis on a démontré qu'elle était fausse. »

En effet, il serait difficile de sous-estimer les conséquences de ce résultat négatif. SU(5) était la façon la plus élégante qu'on puisse imaginer pour unifier les quarks avec les lep-

tons, et elle menait à la codification des propriétés du modèle standard en termes simples. Même après vingt-cinq ans, je trouve toujours stupéfiant que SU(5) ne marche pas.

Le problème n'est pas qu'il est difficile pour nous, théoriciens, de contourner tel ou tel obstacle. On peut sans fin rajouter à la théorie des symétries et des particules nouvelles, de sorte que cela donne plus de constantes libres à ajuster. Avec plus de constantes à ajuster, on peut ensuite s'arranger pour que la décomposition du proton soit aussi rare qu'on le veut. Il n'est pas difficile de sauver une théorie après un échec expérimental.

Mais ceci dit, les dégâts sont là. Nous avons perdu l'occasion d'observer une prédiction saisissante et unique, venant d'une nouvelle grande idée. Dans sa version la plus simple, la grande unification a fait une prédiction sur le taux de décomposition du proton. Si la grande unification est correcte mais compliquée, de sorte que le taux de décomposition du proton pourrait être égal à tout ce qu'on veut, elle perdrait sa valeur explicative. L'espoir était que l'unification tienne compte des valeurs des constantes dans le modèle standard. Au lieu de cela, la grande unification, si correcte, introduit des nouvelles constantes que l'on doit ajuster à la main pour cacher les effets qui seraient en désaccord avec l'expérience.

Nous avons ici une illustration de la leçon générale dont j'ai parlé plus haut. Quand on cherche à unifier des particules et des forces différentes, on risque d'introduire de l'instabilité dans le monde. Cela est vrai parce qu'on introduit des interactions nouvelles, à l'aide desquelles les particules unifiées peuvent se transformer les unes dans les autres. Il n'y a aucun moyen d'éviter ces instabilités ; en effet, ces processus sont la preuve même de l'unification. La seule question est que, soit nous avons affaire à un bon cas – comme le modèle standard, qui a fait des prédictions non équivoques et rapidement confirmées expérimentalement – soit à un mauvais cas, dans lequel nous devons tripoter la théorie pour en cacher les conséquences. C'est le dilemme même des théories unifiées contemporaines.

5
De l'unification À la superunification

L'échec des premières théories de grande unification déclencha une crise dans le monde scientifique, qui continue jusqu'à ce jour. Avant les années 1970, la théorie et l'expérience cheminaient main dans la main. Les idées nouvelles étaient testées au maximum quelques années après leur apparition, peut-être une décennie, mais pas plus. Tous les dix ans, depuis les années 1780 jusqu'aux années 1970, une avancée majeure dans notre connaissance des fondements de la physique eut lieu et, à chacune de ces avancées, la théorie et l'expérimentation s'enrichissaient mutuellement ; mais depuis la fin des années 1970, pas une percée originale n'a vu le jour dans notre compréhension de la physique des particules élémentaires.

Quand une grande idée échoue, il y a deux façons de réagir. On peut baisser la barre et se retirer vers la science incrémentale, sondant petit à petit les frontières de la connaissance à l'aide des nouvelles techniques théoriques et expérimentales. Nombreux sont les physiciens des particules qui ont choisi cette voie. Ainsi, le modèle standard est très bien testé expérimentalement. La découverte du dernier quart du siècle qui a eu le plus de conséquences est que les neutrinos ont une masse ; cependant ce résultat peut trouver une place à l'intérieur même du modèle standard, à condition de l'ajuster un peu. Excepté cela, aucune autre modification n'a été introduite.

Une autre façon de répondre à l'échec est d'exploiter une autre idée encore plus grande. Au début, seuls quelques théoriciens choisirent cette voie, puis leur nombre augmenta constamment. C'est une voie qu'ils durent emprunter seuls ; jusqu'à présent, aucune idée nouvelle n'est soutenue par l'expérimentation.

De toutes les pistes explorées, celle qui a reçu le plus d'attention s'appelle « supersymétrie ». Si elle est vraie, elle deviendra un élément aussi fondamental de notre connaissance de la nature que la théorie de la relativité et le principe de jauge.

On a déjà montré que les grandes unifications révèlent des liens cachés entre divers aspects de la nature jusque-là distincts. Par exemple, l'espace et le temps se présentaient à l'origine comme deux concepts très différents ; la théorie de la relativité restreinte les a unifiés. Mais il reste encore deux grandes classes de choses qui forment notre monde : les

particules (quarks, électrons, etc.), qui constituent la matière, et les forces (ou les champs) à l'aide desquelles les particules interagissent.

Le principe de jauge unifie trois de ces forces, mais cela n'empêche pas que ces deux entités séparées, les particules et les forces, soient toujours séparées. Leur unification était le but des deux tentatives précédentes : la théorie de l'éther et la théorie unifiée des champs, qui ont toutes deux échoué. La supersymétrie est une troisième tentative.

Selon la théorie quantique, les particules sont des ondes et les ondes des particules, mais cela n'unifie pas vraiment les particules et les forces ; en effet, en théorie quantique, il reste deux grandes classes d'objets élémentaires, *fermions* et *bosons*.

Toutes les particules qui constituent la matière, comme les électrons, les protons et les neutrinos, sont des fermions. Toutes les forces sont quant à elles composées de bosons. Le photon est un boson, ainsi que les particules associées aux autres champs de jauge, comme les particules W et Z. La particule de Higgs est elle aussi un boson. La supersymétrie offre une méthode originale et créative pour unifier ces deux grandes classes de particules, bosons et fermions, en proposant que chaque particule connue ait un partenaire jusque-là jamais observé, qu'on appellera son « superpartenaire ».

En résumé, la supersymétrie est un processus dans lequel on peut remplacer, dans le cadre de certaines expériences, un des fermions par un boson, sans changer les probabilités des différentes issues possibles de cette expérience. Ce n'est pas facile à réaliser, car fermions et bosons ont des caractéristiques très différentes. Les fermions doivent obéir au *principe d'exclusion*, découvert par Wolfgang Pauli en 1925, selon lequel deux fermions ne peuvent pas occuper le même état quantique. C'est pourquoi tous les électrons dans un atome ne sont pas situés sur la même orbitale de plus basse énergie ; une fois que l'électron se trouve sur une orbite particulière, ou dans un état quantique particulier, on ne peut plus mettre un autre électron dans le même état. Le principe d'exclusion de Pauli explique plusieurs propriétés des atomes et des matériaux. Pourtant, les bosons se comportent de façon opposée : ils aiment bien partager les mêmes états quantiques. Quand on met un photon dans un certain état quantique, on augmente en fait la probabilité qu'un autre photon se mette dans le même état. Cette affinité explique plusieurs propriétés des champs, du champ électromagnétique par exemple.

Par conséquent, il nous a d'abord semblé fou d'inventer une théorie qui permettrait de remplacer un boson par un fermion tout en conservant un monde stable. Mais, que cela paraisse plausible ou pas, quatre scientifiques russes ont découvert qu'ils étaient capables de mettre sur papier une théorie cohérente, possédant exactement la symétrie nécessaire, qu'ils ont appelée « supersymétrie ». Il s'agissait de Evguéni Likhtman et Youri Golfand en 1971, et Vladimir Akoulov et Dmitri Volkov en 1972.

À cette époque, les scientifiques occidentaux n'avaient que très peu de contacts avec les scientifiques de l'Union soviétique. On ne permettait que rarement aux chercheurs soviétiques de voyager à l'étranger et on les décourageait de publier leurs articles dans des revues non soviétiques. La plupart des physiciens occidentaux ne lisaient pas les traductions des revues soviétiques, et il y eut, par conséquent, quelques découvertes faites en URSS passées inaperçues en Occident. La découverte de la supersymétrie en fait partie.

La supersymétrie a donc été découverte deux fois encore. En 1973, quelques caractéristiques particulières de la supersymétrie ont été mises à jour par deux physiciens européens, Julius Wess et Bruno Zumino. Contrairement à son équivalent russe, ce travail fut remarqué et les idées contenues vite développées. L'une de leurs théories était une extension de l'électromagnétisme, où le photon était unifié avec une particule qui ressemblait beaucoup au neutrino. L'autre découverte de la supersymétrie est liée à la théorie des cordes ; nous en reparlerons en détail plus loin.

La supersymétrie pouvait-elle être vraie ? Pas dans sa forme initiale, qui demandait que, pour chaque fermion, il existe un boson avec la même masse et la même charge électrique. Cela voulait dire, en particulier, qu'il devait y avoir un boson avec la même masse et la même charge que celles de l'électron. Cette particule, si elle avait existé, s'appellerait *sélectron*, un raccourci pour superélectron. Mais si elle avait existé, nous l'aurions déjà observée dans un accélérateur.

Ce problème peut être résolu en appliquant l'idée de la brisure spontanée de la symétrie à la supersymétrie. Le résultat est simple. Le sélectron possède une grande masse, de telle sorte qu'il devient beaucoup plus lourd que l'électron. En ajustant les constantes libres de la théorie – dont il semble qu'elle en ait plusieurs – on peut rendre le sélectron aussi lourd qu'on le veut. Mais il existe une limite supérieure concernant le poids d'une particule qu'un accélérateur donné peut produire. C'est pourquoi on n'a pas encore vu le sélectron dans un accélérateur de particules.

Cette histoire ressemble à bien d'autres que nous avons déjà racontées. Un scientifique énonce une nouvelle unification. Elle a de riches conséquences pour l'expérimentation. Malheureusement, elle se trouve en désaccord avec l'expérimentation. Ensuite, les scientifiques compliquent la théorie de telle façon que de nouvelles constantes ajustables apparaissent. Enfin, ils ajustent certaines de ces constantes afin de cacher les phénomènes que la théorie prédit, mais qui ne sont pas observés ; ceci expliquant pourquoi l'unification en question, si elle est vraie, n'a pas abouti à de nouvelles observations. Mais ces manœuvres rendent la théorie difficile à falsifier, puisqu'on peut toujours expliquer n'importe quel résultat négatif en ajustant encore quelques constantes.

Dans l'histoire de la supersymétrie, dès le début, l'enjeu était de cacher les conséquences de l'unification. Cela ne signifie pas que la supersymétrie n'est pas vraie, mais cela explique pourquoi, après plus de trente ans de développement intense, elle n'a pas encore donné lieu à des prédictions non ambiguës et testables.

Je ne peux qu'imaginer comment Wess, Zumino et Akoulov (le seul parmi les collègues russes encore vivant) doivent se sentir. Il est possible qu'ils aient fait la découverte la plus importante de leur génération. Ou il est aussi possible qu'ils aient simplement inventé un petit jouet théorique, qui n'a aucun rapport avec les phénomènes de la nature. Jusqu'à ce jour, il n'existe aucune preuve ni de l'un ni de l'autre. Depuis trente ans, la première chose que l'on fasse avec chaque nouvel accélérateur de particules que l'on construit est de chercher les particules prédites par la supersymétrie. Aucune n'a été trouvée. Alors, les scientifiques se contentent de monter encore les valeurs des constantes et d'attendre l'expérience suivante.

Aujourd'hui, cette stratégie signifie que nous devons être vigilants avec le LHC (*Large Hadron Collider*), actuellement en construction au CERN. Si tout va selon les prévisions, le LHC sera fonctionnel en 2007. Les physiciens des particules ont grand espoir que cette machine les sauvera de la crise. Premièrement, ils souhaitent que le LHC leur révèle la particule de Higgs, un boson massif qui porte le champ de Higgs. Si le LHC ne le révèle pas, nous aurons de gros problèmes.

Mais c'est pour la supersymétrie que les enjeux sont les plus élevés. Si le LHC confirme la supersymétrie, alors sans aucun doute il y aura un prix Nobel pour ses inventeurs. Dans le cas contraire, on distribuera des bonnets d'âne – non pas à eux, car il n'y a pas de honte à avoir inventé une nouvelle théorie –, mais à ceux de ma génération qui ont passé toutes leurs carrières à explorer cette théorie.

Si l'on met autant d'espoir dans le LHC, c'est que ce qu'il nous permettra d'observer nous éclairera beaucoup sur un des cinq problèmes clefs mentionnés au chapitre 1, à savoir l'explication des valeurs des constantes libres du modèle standard. Pour comprendre pourquoi, il faut savoir qu'une caractéristique très surprenante de ces valeurs est qu'elles ne peuvent qu'être ou très grandes ou très petites. Un bon exemple est la différence énorme entre les puissances des différentes forces. La répulsion électrique entre deux protons est plus forte que leur attraction gravitationnelle par un facteur énorme, de l'ordre de 10^{38}. Il existe également de grosses différences entre les masses des particules. Par exemple, la masse de l'électron représente 1/1800^{e} de la masse du proton. Et le boson de Higgs, s'il existe, a une masse au moins cent quarante fois plus grande que celle du proton.

On peut dire, pour résumer, que la physique des particules semble être plutôt hiérarchique que démocratique. Les quatre forces couvrent un grand spectre de puissances, donnant une hiérarchie allant du très fort au très faible, c'est-à-dire de la physique nucléaire à la gravitation. Les différentes masses en physique forment, elles aussi, une hiérarchie. À son sommet se trouve la masse de Planck (rappelez-vous que l'énergie et la masse sont la même chose), qui est l'énergie à laquelle les effets de la gravité quantique deviennent importants. Peut-être dix mille fois plus légère que la masse de Planck se trouve l'échelle où la différence entre l'électromagnétisme et les forces nucléaires disparaît. Les expériences qui ont été conduites à ce niveau d'énergie, qui s'appelle « échelle de l'unification », nous ont montré non pas trois forces, mais une seule. Encore plus bas dans la hiérarchie, 10^{16} fois moins que l'échelle de Planck, se trouve le TeV (téraélectronvolt ou 10^{12} électronvolts), qui est l'énergie à laquelle se produit l'unification de la force électromagnétique avec la force des interactions faibles. Cette échelle s'appelle « échelle des interactions faibles ». C'est dans cette région que nous devrions enregistrer le boson de Higgs et c'est aussi à cette échelle que beaucoup de spécialistes espèrent voir apparaître la supersymétrie. Le LHC est construit de façon à pouvoir explorer la physique à ce niveau. La masse du proton correspond à un millième de cette masse, et encore un autre facteur de 10^{-3} nous donne la masse de l'électron, et la masse du neutrino est au moins un millionième de celle-ci. En bas de cette échelle se trouve l'énergie du vide qui existe à travers l'espace même en l'absence de matière.

Cela donne une image belle, mais mystérieuse. Pourquoi la nature est-elle à ce point hiérarchisée ? Pourquoi la différence entre le plus faible et le plus fort est-elle si grande ? Pourquoi les masses du proton et de l'électron sont-elles si minuscules comparées à la masse de Planck ou à l'échelle de l'unification ? On évoque habituellement ce problème en tant que « problème de la hiérarchie », et on espère que le LHC le mettra au jour.

Alors, que devons-nous exactement voir avec le LHC ? C'est une question centrale de la physique des particules depuis le triomphe du modèle standard au début des années 1970. Les théoriciens disposaient de trois décennies pour se préparer pour le jour où le LHC commencerait à marcher. Sommes-nous prêts ? Aussi gênant que cela paraisse, la réponse est non.

Si nous étions prêts, nous aurions des prédictions théoriques convaincantes sur ce que le LHC va révéler et nous n'aurions qu'à attendre leur confirmation. Étant donné tout ce que nous savons sur la physique des particules, il est bien surprenant que des milliers d'hommes et de femmes extrêmement intelligents n'aient pas été capables de produire une conjecture convaincante sur ce que la prochaine percée expérimentale va révéler. Pourtant, à part l'espoir de trouver le boson de Higgs, nous n'avons pu former à ce jour aucune prédiction non ambiguë.

Vous pourriez penser qu'en l'absence de consensus, il devrait au moins y avoir quelques théories rivales qui fassent de telles prédictions. Mais la réalité est beaucoup plus complexe. Nous avons plusieurs propositions d'unification différentes. Toutes pourraient marcher, dans une certaine mesure, mais aucune n'a semblé exclusivement plus simple et plus explicative que les autres. Aucune ne porte encore le sceau de la vérité. Afin d'expliquer pourquoi trente ans n'ont pas suffi à mettre notre maison théorique en ordre, il faut étudier de près le problème de la hiérarchie. Pourquoi y a-t-il un tel éventail de masses et des autres constantes ?

Le problème de la hiérarchie contient deux défis. Le premier est de trouver ce qui détermine les valeurs des constantes et ce qui fait que les rapports entre elles sont si grands. Le second est de comprendre pourquoi ces valeurs restent là où elles sont. Leur stabilité est étonnante et presque miraculeuse, puisque la mécanique quantique a une étrange tendance à tirer toutes les masses vers la masse de Planck. Ce n'est pas le moment d'expliquer pourquoi il en est ainsi, mais tout se passe comme si les réglages que nous utilisons pour accorder les constantes étaient liés les uns aux autres par des élastiques qui se resserrent sans cesse.

En conséquence, nous pouvons toujours garder des rapports importants entre les valeurs des constantes dans le modèle standard, mais cela exige de choisir ces valeurs de façon très précise. Plus les théoriciens souhaitent des rapports élevés entre les masses, plus ils doivent accorder finement leurs valeurs intrinsèques (celles qui ne tiennent pas compte des effets quantiques) pour qu'elles restent séparées. Le degré exact de finesse dépend des particules considérées.

Les masses des bosons de jauge ne posent pas de problème ; en gros, la symétrie empêche les élastiques de tirer leurs masses à part. Avec ou sans effets quantiques, le photon, c'est-à-dire le boson qui porte le champ électromagnétique, n'a pas de masse du tout ; cela

ne pose donc aucun problème. De même pour les constituants de la matière – les quarks et les leptons : les contributions à leurs masses qui proviennent des effets quantiques sont proportionnelles à leurs masses intrinsèques. Si les masses intrinsèques sont petites, il en est de même pour les masses totales. On dit, par conséquent, que les masses des bosons de jauge et des fermions sont *protégées*.

Le problème vient des particules non protégées, ce qui signifie, dans le modèle standard, le boson de Higgs et rien d'autre. Il se trouve que pour protéger la masse du boson de Higgs, pour l'empêcher de tendre vers la masse de Planck, on est obligé d'ajuster les constantes du modèle standard avec la précision incroyable de trente-deux chiffres dans leur écriture décimale. Juste une petite erreur dans l'un de ces trente-deux chiffres, et le boson de Higgs devient alors beaucoup plus lourd que ne le prévoit la prédiction.

Le défi consiste donc à apprivoiser le Higgs, c'est-à-dire à le remettre à la bonne taille. Plusieurs des importantes recherches que mènent les physiciens des particules depuis 1975 ne servent qu'à atteindre ce but.

Une façon d'apprivoiser le Higgs est de dire qu'il n'est pas du tout une particule élémentaire. S'il était constitué de particules moins sauvages, le problème serait alors résolu. Il existe quelques propositions sur la composition du boson de Higgs. La théorie la plus élégante et économe avance l'hypothèse que les bosons de Higgs sont des états fondamentaux de quarks ou de leptons très lourds. Rien de nouveau n'est ajouté – aucune particule nouvelle et aucun paramètre ne sont à ajuster. La théorie énonce juste le fait que les particules lourdes s'assemblent d'une nouvelle façon. Le seul problème avec ce genre de théorie est qu'il est difficile de faire les calculs dont on a besoin pour la vérifier et pour en tirer les conséquences. Lorsque cette théorie a été proposée dans les années 1960, nos capacités techniques ne nous permettaient pas de réaliser les calculs nécessaires, et nous en sommes toujours au même point.

Une autre hypothèse élégante est que le boson de Higgs soit constitué d'une nouvelle espèce de quark, différente de celles dont sont faits les protons et les neutrons. Comme de prime abord cela semble être une solution « technique » au problème, ces nouvelles particules ont été appelées *techniquarks*. Elles seraient reliées par une force nouvelle qui ressemble à l'interaction forte, celle qui lie ensemble les quarks en protons et neutrons. Parce que cette force en chromodynamique quantique est souvent appelée « couleur », la nouvelle force a naturellement reçu le nom de « technicouleur ».

L'hypothèse de technicouleur s'offre plus facilement au calcul. Le problème est qu'il est difficile d'obtenir que cette force soit en accord avec tous les aspects des observations. Cependant, ce n'est pas totalement impossible, car il existe toujours plusieurs solutions. La majorité d'entre elles ont été réfutées ; mais quelques-unes ont survécu.

La troisième partie de l'alternative serait de faire de *toutes* les particules élémentaires des particules composites. Cette idée a été poursuivie par quelques chercheurs à la fin des années 1970. Il était naturel d'essayer cette solution : si les protons et les neutrons sont faits de quarks, alors pourquoi s'arrêter là ? Peut-être y a-t-il un autre niveau de structure, où les quarks, les électrons, les neutrinos et pourquoi pas même le Higgs et les bosons de jauge, seraient tous perçus comme des particules composées, faites d'éléments encore plus

fondamentaux appelés *préons*. Ces théories ont très bien fonctionné, avec beaucoup d'élégance. À l'époque, l'expérimentation a fourni les preuves de l'existence de quarante-cinq fermions fondamentaux, et tous pouvaient être obtenus à partir des combinaisons de seulement deux espèces de préons.

De plus, ces modèles de préons ont pu expliquer quelques faits observés dans la nature que le modèle standard laissait sans explication. Par exemple, les quarks ont deux caractéristiques : la couleur et la charge électrique qui paraissent sans lien l'une avec l'autre. Chaque espèce de quarks vient en trois versions qu'on appelle couleurs. Ce triplement donne la symétrie, qui est nécessaire pour la théorie de jauge. Mais pourquoi trois couleurs ? Pourquoi pas deux ou quatre ? Chaque quark a aussi une charge électrique, et celle-ci vient en unité égale à un tiers ou deux tiers de la charge de l'électron. Le nombre 3 apparaît dans les deux cas, ce qui suggère que ces deux caractéristiques, la couleur et la charge, ont une origine commune. Ni le modèle standard, ni, à ma connaissance, la théorie des cordes ne s'attaquent à ce problème, tandis qu'il est expliqué très facilement par le modèle des préons.

Malheureusement, il y a des questions majeures que la théorie des préons n'était pas capable de résoudre. Elles concernent la force inconnue qui doit lier les préons ensemble dans les particules que nous observons. Le défi est de garder les particules observées aussi petites qu'elles sont, tout en les gardant aussi très légères. Puisque les théoriciens des préons ne savaient pas comment résoudre ce problème, le modèle des préons est mort en 1980. Récemment, j'ai discuté avec des physiciens réputés qui ont soutenu leurs thèses après cette date, et certains n'ont jamais entendu parler des préons.

En résumé, les tentatives de faire du boson de Higgs une particule composite n'ont pas réussi. Il a semblé pendant un certain temps que nous, les théoriciens, n'avions plus aucune solution possible. Si le boson de Higgs est élémentaire, comment est-il alors possible de l'apprivoiser ?

Une façon de limiter la liberté d'une particule est de lier son comportement à une autre particule, dont le comportement est contraint. On sait que les bosons de jauge et les fermions sont protégés ; leurs masses évitent la croissance folle. Serait-il possible qu'il y ait une symétrie qui lierait le Higgs à une particule dont la masse est protégée ? Si nous pouvions faire cela, alors peut-être saurions-nous enfin apprivoiser le Higgs ? La seule symétrie connue pour réaliser cela était la supersymétrie, parce que celle-ci mettait en relation les fermions et les bosons ; par conséquent, en théorie supersymétrique, il y aura un fermion, le superpartenaire du Higgs, appelé Higgsino. (Dans la convention du langage supersymétrique, les superpartenaires des fermions commencent par un « s » et les superpartenaires des bosons finissent en « ino ».) Puisque le Higgsino est un fermion, sa masse sera protégée du gain de poids quantique. Et la supersymétrie nous dit que les superpartenaires ont la même masse. En conséquence, la masse du Higgs sera, elle aussi, protégée.

Cette idée pourrait également expliquer pourquoi la masse du Higgs est si basse comparée à la masse de Planck. Exposée ainsi, l'idée paraît assez élégante ; en pratique, les choses sont plus compliquées.

Premièrement, la théorie ne peut être supersymétrique qu'en partie. Si une particule a un superpartenaire, alors toutes les particules doivent en avoir un. Ainsi, chaque quark vient avec un boson partenaire, appelé *squark*. Le photon entre en partenariat avec un nouveau fermion, le *photino*. Dans ce cas-là, les interactions sont ajustées de telle sorte que si l'on remplace tous les quarks par les squarks et, en même temps, tous les photons par les photinos, les probabilités des différentes issues expérimentales possibles resteraient alors inchangées.

Certes, il existe une possibilité plus simple. Est-ce envisageable que deux particules que l'on a déjà observées soient en partenariat ? Peut-être le photon avec le neutrino ? ou le Higgs et l'électron ? La découverte des relations nouvelles entre les particules déjà connues serait sans doute élégante – et convaincante aussi.

Malheureusement, personne n'a jamais pu établir une relation supersymétrique entre deux particules déjà connues. Au contraire, dans toutes les théories supersymétriques, le nombre de particules a au moins été doublé. On postulait simplement un nouveau superpartenaire pour chaque particule déjà connue. Non seulement on obtenait de cette façon des squarks, des sleptons et des photinos, mais aussi des sneutrinos pour servir de partenaire aux neutrinos, des Higgsinos pour le Higgs et des gravitinos pour les gravitons. Une paire suivant une autre, tout cela se rassemblait en une véritable arche de Noé des particules. Tôt ou tard, pris au filet des nouveaux snoms et nominos, vous commencez à vous sentir comme Sbozo le clown. Ou Bozo le clownino. N'importino squoi.

Pour le meilleur ou pour le pire, la nature ne marche pas ainsi. Comme je l'ai déjà fait remarquer, aucune expérience n'a jamais prouvé l'existence du sélectron. Il s'avère qu'à ce jour il n'y a pas de squarks, ni de sleptons ou de sneutrinos. Le monde contient une quantité énorme de photons (plus d'un milliard pour chaque proton), mais personne n'a jamais vu un seul photino.

La solution pour résoudre ce problème serait de poser que la supersymétrie est spontanément brisée. Nous avons vu au chapitre 4 comment une symétrie pouvait se briser spontanément. Cette brisure spontanée peut s'étendre aussi à la supersymétrie. Des théories ont été proposées, qui décrivent un monde où les forces sont supersymétriques, mais où les lois sont accordées de telle façon que l'état énergétique fondamental – c'est-à-dire l'état où la symétrie disparaît – n'est pas supersymétrique. En résultat, le partenaire supersymétrique de chaque particule n'a pas besoin de posséder la même masse que la particule en question.

Cela compose une théorie particulièrement vilaine. Pour briser la symétrie, on doit ajouter de plus en plus de particules, par analogie avec le Higgs. Elles ont besoin elles aussi d'avoir des superpartenaires. Il y a de plus en plus de constantes libres que l'on peut ajuster pour décrire les propriétés de ces particules. Toutes les constantes de la théorie doivent être ajustées de telle sorte que toutes les particules nouvelles seront trop lourdes pour être observées.

En réalisant cela dans le modèle standard de la physique des particules élémentaires, sans ajouter de présupposés supplémentaires, on obtient un résultat qui s'appelle « extension supersymétrique minimale du modèle standard », ou MSSM. Comme je l'ai noté au

chapitre 1, le modèle standard d'origine a environ vingt paramètres libres qu'on doit ajuster à la main pour obtenir les prédictions en accord avec l'expérience. Le MSSM possède cent cinq paramètres de plus. Le théoricien a la liberté de les ajuster pour s'assurer que la théorie est en accord avec l'expérience. Si MSSM est correcte, alors Dieu est un technomaniaque. Ou un (ou une) de ces gosses qui veulent un système audio avec le plus de réglages possible ou un bateau à voile avec seize lignes différentes pour ajuster la forme de chaque voile.

Évidemment, il n'est pas impossible que la nature soit ainsi faite. La théorie a le potentiel pour résoudre les problèmes d'accordage fin. Ce que l'on obtient en augmentant le nombre de réglages de 20 à 125, c'est qu'aucun des réglages nouveaux n'a besoin d'être ajusté aussi finement que les anciens. Cependant, avec autant de réglages à ajuster, il est difficile pour un expérimentateur de vérifier ou de falsifier cette théorie.

Il y a beaucoup de valeurs de réglages pour lesquelles la supersymétrie est brisée et où chaque particule a une masse différente de celle de son superpartenaire. Afin de cacher toutes les moitiés qui nous manquent, il faut ajuster les réglages de telle façon que les particules manquantes possèdent des masses plus élevées que celles que nous voyons. Il ne faut pas se tromper, parce que, si par exemple les squarks étaient plus légers que les quarks, cela poserait un sacré problème. Pourtant, pas de souci ! Il s'avère qu'il existe plusieurs manières différentes d'ajuster les réglages pour s'assurer que toutes les particules qu'on ne voit pas sont assez lourdes pour être restées invisibles jusqu'à présent.

Si le réglage fin doit être expliqué, la théorie devrait, elle, expliquer pourquoi le boson de Higgs a une masse aussi grande que ce que nous pensons. Comme je l'ai déjà noté, il n'existe pas de prédiction exacte pour la masse du Higgs même dans le modèle standard, mais on sait qu'elle doit être plus de cent vingt fois supérieure à la masse du proton. Pour que ceci soit une prédiction de la supersymétrie, la théorie supersymétrique doit être ajustée de telle façon qu'à cette échelle énergétique, la supersymétrie est restaurée. Cela signifie que les superpartenaires manquants doivent, eux aussi, avoir des masses proches de cette échelle, et si tel est le cas, le LHC devra alors les voir aussi.

Beaucoup de théoriciens espèrent que c'est ce que montrera le LHC : beaucoup de nouvelles particules que l'on interprétera comme les super-partenaires manquants. Si le LHC satisfait à leurs espoirs, ce sera sans doute le grand triomphe de la physique théorique de ces trente dernières années. Pourtant, je vous rappelle qu'il n'y a pas de prédictions claires. Même si MSSM est vrai, il existe beaucoup de façons différentes d'ajuster ses cent vingt-cinq paramètres pour qu'ils s'accordent avec notre connaissance actuelle. Ces différentes façons d'ajuster les paramètres mènent à une dizaine de scénarios bien distincts, ce qui donne, finalement, des prédictions bien différentes sur ce que le LHC nous montrera exactement.

Il y a encore d'autres problèmes. Supposez que le LHC produise une nouvelle particule. Étant donné que la théorie supersymétrique autorise des scénarios différents, il est alors possible que même si la supersymétrie se révélait fausse, nous soyons tout de même capables de l'ajuster pour qu'elle soit en accord avec les premières observations du LHC. Malheureusement, pour confirmer la supersymétrie, il faut bien plus que cet accord. Nous

aurons à découvrir beaucoup de nouvelles particules et à les expliquer. Et peut-être ne seront-elles pas toutes des superpartenaires des particules déjà connues. Une particule nouvelle peut être superpartenaire d'encore une autre particule nouvelle qu'on n'aura simplement pas encore enregistrée.

La seule voie inattaquable pour prouver la véracité de la supersymétrie sera de montrer qu'il y a effectivement une symétrie, c'est-à-dire que les probabilités des différentes issues expérimentales possibles ne varient pas (ou varient de façon contrôlée et restreinte) lorsqu'on substitue une particule à son superpartenaire. Mais c'est une chose qu'il ne sera pas facile de prouver avec le LHC, au moins au début. Par conséquent, même dans les circonstances les plus favorables, beaucoup d'années passeront avant que nous sachions si la supersymétrie est l'explication correcte du problème du réglage fin.

Cependant, il s'avère qu'un grand nombre de théoriciens, aujourd'hui, croient en la supersymétrie. Et nous avons de bonnes raisons de penser que celle-ci est un pas en avant par rapport aux anciennes théories sur l'unification. Premièrement, le boson de Higgs, s'il n'est pas réduit à un point, ne doit pas être trop grand. Ceci est en faveur de la supersymétrie et contre certaines théories (mais pas toutes) de technicouleur. Il y a aussi un autre argument qui provient de l'idée d'une grande unification. Comme je l'ai déjà dit plus haut, les expériences que l'on mènera à l'échelle de l'unification ne doivent pas distinguer entre l'électromagnétisme et les forces nucléaires. Le modèle standard prédit que cette échelle de l'unification existera, mais pour y parvenir, il demande à être légèrement modifié. La version supersymétrique du modèle achève l'unification de façon plus directe.

La supersymétrie est sans doute une idée théorique à laquelle il est difficile de résister. L'unification des forces et de la matière résoudrait la dualité la plus profonde de la physique fondamentale. Il n'est guère étonnant qu'autant de physiciens ne puissent pas concevoir que le monde ne soit pas supersymétrique.

En même temps, certains physiciens s'inquiètent réellement du fait que la supersymétrie, si elle est réelle, aurait déjà dû être prouvée par une expérience. Voici une citation assez caractéristique, tirée de l'introduction d'un article récent :

> Un autre problème vient du fait que le LEP II (le Large Electron-Positron Accelerator, également au CERN) n'a découvert ni les superparticules, ni le boson de Higgs[19].

Paul Frampton, éminent théoricien à l'université de la Caroline du Nord, m'a récemment écrit ceci :

> Une observation d'ordre général, que j'ai faite au cours des dix dernières années, est que la majorité des chercheurs (à quelques exceptions près, mais il y en a peu), qui travaillent sur la phénoménologie de la brisure de la supersymétrie à l'échelle TeV, croient que la probabilité que la supersymétrie à cette échelle surgisse dans une expérience est largement inférieure à 50 % ; une estimation de l'ordre de 5 % étant assez caractéristique[20].

Ma propre réponse, qui vaut ce qu'elle vaut, est que la supersymétrie n'expliquera pas les observations du LHC (au moins sous la forme dans laquelle elle a été étudiée jusqu'à

maintenant). En tout cas, on peut décider si la supersymétrie est fausse ou pas par l'expérimentation, et quelles que soient nos préférences esthétiques, nous avons tous hâte de savoir si elle est une vraie théorie de la nature.

Toutefois, même si la supersymétrie était détectée, elle ne serait, en l'état, la solution à aucun des cinq grands problèmes que j'ai récapitulés au chapitre 1. Les constantes du modèle standard ne seront pas expliquées, parce que MSSM a beaucoup *plus* de constantes libres. Les choix possibles concernant la théorie quantique de la gravitation n'auront pas diminué, parce que les alternatives majeures sont toutes cohérentes avec l'idée que le monde est supersymétrique. Il se pourrait que la matière noire soit faite des superpartenaires, mais dans ce cas, on aura certainement besoin d'une preuve directe.

La raison de cette insuffisance plus importante est que, alors que les théories supersymétriques possèdent beaucoup plus de symétrie, elles n'en sont pas plus simples. En fait, elles sont beaucoup plus compliquées que les théories qui possèdent moins de symétrie. Elles ne font pas décroître le nombre de constantes libres – au contraire, leur nombre grandit de façon assez considérable. Et elles ne réussissent pas à unifier deux choses quelconques déjà connues. La supersymétrie serait absolument irrésistible – autant que l'unification de l'électricité et du magnétisme de Maxwell – seulement si elle permettait de découvrir une grande similitude entre deux choses déjà connues. S'il s'avérait que le photon et l'électron sont des superpartenaires, ou même juste le neutrino et le Higgs, cela serait vraiment fantastique.

Aucune des théories supersymétriques n'a permis une telle découverte. Au contraire, elles postulent, sans exception, tout un ensemble de particules nouvelles qu'elles rendent symétriques soit à une particule déjà connue, soit – encore « mieux » – à une particule qui, elle, n'est pas encore connue. Ce type de succès théorique est beaucoup trop facile. Inventer tout un monde inconnu et ensuite créer une théorie avec assez de paramètres ajustables pour cacher tout ce qu'il y a de nouveau, ce n'est pas très impressionnant même si, techniquement, cela constitue un défi tout à fait respectable. C'est le genre de théorisation qui ne peut jamais échouer, car tout désaccord avec les données peut être éliminé en jouant un peu avec quelques constantes. On ne peut rater une entreprise pareille que lorsqu'on la met en confrontation avec l'expérience.

Évidemment, tout ceci ne veut pas dire pas que la supersymétrie n'est pas réelle. Elle pourrait l'être et, si elle l'était, elle aurait de bonnes chances d'être découverte dans les quelques années qui viennent, au LHC. Mais le fait que la supersymétrie ne fournisse pas tous les résultats attendus d'elle suggère que ses partisans sont assis sur une branche beaucoup trop haute, bien plus haute que le tronc solide et les souches robustes de la science empirique. Ceci n'est peut-être que le prix à payer lorsque l'on cherche l'endroit le plus mince pour scier le bois, comme disait Einstein.

6
Gravité quantique : La bifurcation

À l'époque où la plupart des physiciens négligeaient la gravité, quelques âmes courageuses ont commencé, dans les années 1930, à réfléchir sur la façon de la concilier avec la théorie quantique, qui était à l'époque en pleine expansion. Pendant plus d'un demi-siècle, personne, une poignée de pionniers exceptée, n'a travaillé sur la gravité quantique et peu nombreux étaient ceux qui s'intéressaient à leur travail. Mais le problème de la gravité quantique ne pouvait pas continuer d'être ignoré. Des cinq questions que j'ai décrites au premier chapitre, elle est la seule qui ne peut pas ne pas être résolue. Contrairement aux autres questions, elle ne demande rien d'autre que la découverte du langage dans lequel sont écrites les lois de la nature. Essayer de résoudre l'un des autres problèmes sans avoir résolu celui-ci serait comme d'essayer de négocier un contrat dans un pays sans législation.

La recherche de la gravité quantique est une véritable quête. Ses pionniers étaient les explorateurs de nouvelles façons de penser et de nouveaux mondes possibles. Aujourd'hui, nous sommes plus nombreux, et quelques parties de ce nouveau paysage ont déjà été cartographiées. Quelques pistes ont été explorées, mais nous ne sommes parvenus qu'à des impasses. Et bien que l'on suive d'autres pistes, certaines d'ailleurs très encombrées, on est loin de pouvoir dire qu'à ce jour le problème est résolu.

J'ai écrit une bonne partie de ce livre en 2005, année du centenaire des grandes découvertes d'Einstein, riche en colloques et manifestations diverses pour commémorer cet anniversaire. C'était une occasion comme une autre pour attirer l'attention sur la physique, mais cela ne s'est pas fait sans ironie. Certaines découvertes d'Einstein ont été si radicales que, aujourd'hui encore, des physiciens théoriciens ne leur accordent pas toute l'importance qu'ils devraient, le bouleversement de l'espace et du temps dans la relativité générale en tête.

La leçon principale de la relativité générale est que la géométrie de l'espace n'est pas fixe. Elle évolue de façon dynamique, en se modifiant dans le temps lorsque la matière se déplace. Il existe même des ondes – les ondes gravitationnelles – qui voyagent à travers la géométrie de l'espace. Avant Einstein, les lois de la géométrie euclidienne que nous apprenions à l'école étaient perçues comme des lois éternelles ; il a toujours été, il est et il sera toujours vrai que la somme des angles d'un triangle est égale à 180 degrés. Mais, en relati-

vité générale, la somme des angles d'un triangle peut être égale à tout ce qu'on veut, puisque la géométrie de l'espace est courbe.

Cela ne signifie pas qu'il existe encore une autre géométrie fixe qui caractériserait l'espace, celui-ci étant comme une sphère ou une selle au lieu d'être un plan. L'idée est que la géométrie peut être vraiment *tout*, parce qu'elle évolue dans le temps en réponse à la présence de matière et de forces. Il n'y a pas de loi qui dise laquelle des géométries est la bonne ; au contraire, il n'existe qu'une loi qui régit les modifications de la géométrie – exactement comme dans le cas des lois de Newton, qui ne nous disent pas où se trouvent les objets, mais seulement comment ils se déplacent, en énumérant les effets que les forces peuvent produire sur leur mouvement.

Avant Einstein, la géométrie était considérée comme partie intégrante des lois. Einstein a montré que la géométrie de l'espace évolue dans le temps selon d'autres lois, encore plus profondes. Il est important de bien comprendre ce point. *La géométrie de l'espace ne fait pas partie des lois de la nature*. Par conséquent, rien qu'on puisse trouver dans ces lois ne nous dit ce qu'est la géométrie de l'espace. Ainsi, avant de commencer à résoudre les équations de la théorie générale de la relativité d'Einstein, nous n'avons strictement aucune idée de ce qu'est la géométrie. On la découvrira seulement une fois les équations résolues.

Cela signifie que les lois de la nature doivent s'exprimer sous une forme qui ne présuppose pas que l'espace ait une géométrie fixe. C'est le cœur de la leçon einsteinienne. Cette forme se traduit en un principe, déjà décrit plus haut, celui *d'indépendance par rapport au fond*. Ce principe énonce que les lois de la nature peuvent être décrites dans leur totalité sans présupposer la géométrie de l'espace. Dans l'ancienne représentation du monde, où la géométrie était fixe, on pouvait considérer la géométrie comme une partie du fond, cette scène éternelle sur lequel se joue le spectacle de la nature. Dire que les lois de la nature sont indépendantes du fond, cela signifie que la géométrie de l'espace n'est pas fixe, mais qu'elle évolue. L'espace et le temps émergent de ces lois plutôt que de faire partie de la scène où se joue le spectacle.

Un autre aspect de l'indépendance par rapport au fond est qu'il n'existe pas de temps privilégié. La relativité générale décrit l'histoire du monde au niveau fondamental en termes d'événements et de relations entre eux. Les relations les plus importantes concernent la causalité : un événement peut se trouver dans la chaîne causale qui mène à un autre événement. De ce point de vue, l'espace est un concept secondaire, totalement dépendant de la notion de temps. Prenons une horloge. Nous pouvons penser à tous les événements qui se déroulent simultanément lorsqu'elle sonne midi. Ce sont lesdits événements qui constituent l'espace.

Un aspect important de la théorie de la relativité générale est qu'il n'existe pas de moyen meilleur qu'un autre de mesurer le temps. N'importe quelle horloge fera l'affaire, tant qu'elle nous montre les causes avant les effets. Or, puisque toute définition concrète de l'espace dépend du temps, il existe autant de définitions de l'espace que de temporalités différentes. J'ai dit un peu plus haut que la géométrie de l'espace évolue dans le temps. Cela est valable non seulement pour la notion de temps unique et universelle, mais aussi pour toute autre notion de temps. C'est ce qui fait la beauté de la théorie générale de la

relativité d'Einstein. Dans ce livre, il suffira de se souvenir du fait que ce sont les équations de la théorie qui disent comment la géométrie de l'espace évolue dans le temps, et ceci non seulement dans le cas d'une définition unique, mais également pour toute définition possible du temps.

En fait, l'indépendance par rapport au fond signifie encore plus. Il existe d'autres aspects de la nature qui sont fixes dans les expressions habituelles des lois de la physique. Mais peut-être ne devraient-ils pas l'être. Par exemple, le nombre de dimensions de l'espace, trois, fait partie du fond. Serait-il possible qu'une autre théorie, plus profonde, ne nécessite pas de présupposer le nombre de dimensions spatiales ? Dans une telle théorie, les trois dimensions pourraient émerger comme solutions d'une loi dynamique. Il n'est pas exclu que, dans cette théorie, le nombre de dimensions spatiales puisse même évoluer dans le temps. Si nous étions capables d'inventer une théorie comme celle-ci, elle pourrait nous expliquer pourquoi l'univers a trois dimensions. Cela serait donc un progrès certain, puisqu'une chose, auparavant simplement postulée, serait enfin expliquée.

En résumé, l'idée de l'indépendance par rapport au fond, dans sa formulation la plus générale est une façon sage de faire de la physique : faire de meilleures théories, dans lesquelles les choses qui, avant, étaient postulées, seront expliquées, en permettant à de telles choses d'évoluer dans le temps en fonction de lois nouvelles. La théorie générale de la relativité d'Einstein a précisément réalisé cela dans le cas de la géométrie de l'espace.

La question fondamentale pour la théorie quantique de la gravitation est, par conséquent, celle-ci : peut-on étendre à la théorie quantique le principe selon lequel l'espace n'a pas de géométrie fixe ? C'est-à-dire peut-on faire de la théorie quantique indépendante du fond, au moins en ce qui concerne la géométrie de l'espace ? Si la réponse est oui, on aura alors automatiquement trouvé la façon de fusionner la gravité et la théorie quantique, car celle-ci a déjà été interprétée comme étant un aspect de la géométrie dynamique de l'espace-temps.

Par conséquent, il existe deux approches de la fusion de la gravité et de la théorie quantique : celle qui mène à l'indépendance par rapport au fond et celle qui n'y mène pas. L'étude de la gravité quantique était, dans les années 1930 encore, divisée selon cette ligne de partage, même si aujourd'hui la majorité des approches que l'on étudie sont indépendantes du fond. La seule exception est l'approche qu'étudient, à ce jour, la majorité des physiciens : la théorie des cordes.

Comment est-il possible que le résultat le plus important du plus grand des scientifiques du XX^{e} siècle ait été quasiment ignoré par la majorité de ceux qui prétendent suivre ses pas ? C'est l'une des histoires les plus étranges de toute la science, que je vais raconter ici, car elle est un élément essentiel du puzzle, si l'on essaye de réfléchir aux questions posées dans l'introduction de cet ouvrage. En effet, vous pourriez vous demander : étant donné que la théorie de la relativité générale d'Einstein est si bien acceptée, pourquoi quelqu'un tenterait-il encore de développer une théorie qui ne suivrait pas cette direction ? La réponse à cette question est longue, et comme beaucoup d'autres histoires racontées dans ce livre, elle commence avec Einstein.

En 1916, Einstein avait déjà compris qu'il existait des ondes gravitationnelles et qu'elles portaient une énergie. Il a tout de suite remarqué que la condition de cohérence avec la physique atomique demande que l'énergie portée par les ondes gravitationnelles soit décrite dans les termes de la théorie quantique. Dans le tout premier article qui a jamais été écrit au sujet des ondes gravitationnelles, Einstein a écrit qu'» il apparaît que la théorie quantique doit non seulement modifier la théorie de l'électrodynamique de Maxwell, mais également la nouvelle théorie de la gravitation[21] ».

Néanmoins, bien qu'Einstein fût le premier à formuler le problème de la gravité quantique, cette percée est restée longtemps ignorée par la plupart de ceux qui, depuis, se sont attaqués au sujet. Comment une chose pareille est-elle possible ?

Il y a une raison : personne, à l'époque, ne savait comment appliquer directement la théorie quantique à la relativité générale, qui était aussi en pleine expansion à la même époque. Et pour une bonne raison : le progrès ne s'est avéré possible qu'après avoir emprunté une voie indirecte. En effet, ceux qui voulaient appliquer la mécanique quantique à la relativité générale étaient confrontés à deux défis. À part l'indépendance du fond, ils avaient dû se débattre avec le fait que la relativité générale est une théorie des champs. Elle fournit un nombre infini de géométries d'espace possibles et, par conséquent, elle contient une infinité de variables.

Comme je l'ai déjà dit au chapitre 4, lorsque la mécanique quantique a été formulée en totalité, les physiciens ont commencé à l'appliquer aux théories des champs, tel le champ électromagnétique. Ces théories ont été formulées sur un fond spatio-temporel fixe, donc la question d'indépendance par rapport au fond ne se posait même pas. Mais, en même temps, ces théories ont donné aux physiciens l'expérience nécessaire dans la manipulation des situations où il faut faire face à une infinité de variables.

Le premier succès important de la théorie quantique des champs était l'EDQ – l'unification de la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell avec la théorie quantique. Il est tout à fait remarquable que, dans leur premier article sur l'EDQ, en 1929, Werner Heisenberg et Wolfgang Pauli, deux des fondateurs de la mécanique quantique, avaient déjà prévu d'étendre leur travail à la gravité quantique. Apparemment, ils croyaient que cela ne serait pas très difficile, car ils avaient écrit que « la quantification du champ gravitationnel, qui semble nécessaire pour des raisons physiques, peut être réalisée sans aucune difficulté nouvelle, à l'aide d'un formalisme tout à fait analogue à celui qu'on applique ici[22] ».

Plus de soixante-quinze ans plus tard, on ne peut que s'étonner de la façon dont deux chercheurs si brillants ont sous-estimé la difficulté du problème. À quoi ont-ils pensé ? Je connais la réponse, parce que l'impasse dans laquelle ils se sont trouvés, a été, depuis, explorée en détail.

Heisenberg et Pauli croyaient que, lorsqu'elles sont très faibles, on pouvait considérer les ondes gravitationnelles comme de minuscules ondulations qui viennent déranger une géométrie fixe. Si l'on jette une pierre dans un lac par un matin tranquille, elle provoquera de petites ondulations qui ne dérangeront que très peu la surface plane de l'eau ; il sera alors facile de penser que les rides se déplacent sur un fond fixe, donné par cette surface.

Mais quand les vagues sont fortes et turbulentes, comme près d'une plage lors d'une tempête, cela n'a aucun sens de les considérer comme des perturbations de quelque chose de fixe.

La relativité générale prédit qu'il existe des régions de l'univers où la géométrie de l'espace-temps évolue de façon turbulente, comme les vagues qui viennent frapper la plage. Pourtant, Heisenberg et Pauli croyaient qu'il serait plus facile d'étudier d'abord les cas où les ondes gravitationnelles sont extrêmement faibles et peuvent être considérées comme de petites rides sur un fond fixe. Cela leur permettait d'appliquer les mêmes méthodes que celles qu'ils avaient développées pour l'étude des champs quantiques électromagnétiques, qui se déplacent sur un fond spatio-temporel fixe. Et effectivement, il n'était pas si difficile d'appliquer la mécanique quantique aux ondes gravitationnelles très faibles, en mouvement libre. Le résultat en était que chaque onde gravitationnelle devait être analysée selon la méthode dictée par la mécanique quantique, comme une particule qu'on appelle graviton – analogue au photon, qui est, lui, un quantum du champ électromagnétique. Or, à l'étape suivante, un énorme problème s'est posé, car les ondes gravitationnelles interagissent entre elles. Elles interagissent avec tout ce qui a une énergie ; et elles-mêmes ont aussi une énergie. Ce problème n'apparaît pas pour les ondes électromagnétiques, puisque, bien que les photons interagissent avec les charges électriques et magnétiques, ils ne sont pas eux-mêmes chargés et, par conséquent, ils peuvent facilement traverser les autres photons. Cette différence importante entre deux types d'ondes est exactement ce que Heisenberg et Pauli n'avaient pas compris.

Une description cohérente de l'auto-interaction des gravitons s'est révélé être un problème particulièrement épineux. On comprend maintenant cette difficulté comme une conséquence du fait que le principe einsteinien d'indépendance par rapport au fond n'a pas été pris au sérieux. Puisque les ondes gravitationnelles interagissent les unes avec les autres, elles ne peuvent plus être pensées comme se déplaçant sur un fond fixe. Elles *modifient* le fond sur lequel elles se déplacent.

Dans les années 1920, peu de gens comprenaient cela. La première thèse de doctorat jamais écrite sur le problème de la gravité quantique a été, selon toute vraisemblance, la dissertation soutenue en 1935 par le physicien russe Matveï Petrovitch Bronstein. Ceux qui l'ont connu se souviennent de lui comme de l'un des physiciens soviétiques les plus brillants de sa génération. En 1936, il a écrit dans un article que « l'élimination des inconsistances logiques [demande] qu'on rejette nos concepts d'espace et de temps ordinaires, en les remplaçant par des concepts plus profonds et moins évidents ». Puis, il a cité un proverbe allemand : « Que celui qui en doute paie un *Thaler*[23]. » Le point de vue de Bronstein a été défendu et développé par un jeune physicien français lui aussi très brillant, Jacques Solomon.

Aujourd'hui, presque tous ceux qui réfléchissent sérieusement au problème de la gravité quantique sont d'accord avec Bronstein ; mais cela a pris soixante-dix ans. Une des raisons en est que même des esprits aussi brillants que Bronstein et Solomon n'ont pas pu échapper à la folie de leur temps. Un an après la publication par Bronstein de l'article que je viens de citer, il a été arrêté par la NKVD et fusillé le 18 février 1938. Solomon est devenu

membre de la Résistance française et a été tué par les Allemands le 23 mai 1942. Leurs idées s'étaient perdues dans l'histoire. Ainsi, moi qui ai travaillé toute ma vie sur le problème de la gravité quantique, je n'avais jamais entendu parler d'eux avant d'avoir quasiment terminé l'écriture de ce livre.

Le travail de Bronstein a été oublié, et la plupart des physiciens sont retournés à l'étude de la théorie quantique des champs. Comme je l'ai dit au chapitre 4, ce n'est qu'à la fin des années 1940 que l'EDQ a été pleinement développée. Cette réussite a ensuite inspiré quelques chercheurs qui à nouveau relevèrent le défi d'unifier gravité et théorie quantique. Immédiatement, deux camps se formèrent, en opposition l'un à l'autre. L'un d'eux suivit Bronstein en prenant au sérieux l'idée de l'indépendance par rapport au fond. L'autre l'a ignorée et choisit le chemin d'Heisenberg et de Pauli, en essayant d'appliquer la théorie quantique aux ondes gravitationnelles, considérées comme se déplaçant sur un fond fixe.

Puisque l'indépendance du fond est l'un des principes de la relativité générale, il paraît raisonnable de l'inclure dans des tentatives d'unification avec la théorie quantique. Mais les choses n'étaient pas aussi simples qu'elles le semblaient. Peu de gens – dont le physicien britannique P. A. M. Dirac ou Peter Bergmann, un Allemand qui a commencé sa carrière comme assistant d'Einstein à Princeton – ont essayé de construire une théorie de la gravité quantique indépendante du fond. C'était une tâche ardue. Les tentatives de ce genre n'ont apporté aucun résultat jusqu'au milieu des années 1980, mais, du point de vue de la compréhension de la gravité quantique considérée de façon dépendante du fond, de nombreux progrès ont été enregistrés. La majorité des théoriciens de la gravitation travaillent aujourd'hui sur l'une des approches indépendantes du fond. On y reviendra plus tard dans ce livre, car elles sont les alternatives les plus sérieuses à la théorie des cordes.

Mais aucun de ces signes prometteurs ne s'est manifesté lorsque les chercheurs ont commencé, dans les années 1950, leur recherche dans la voie de la gravité quantique. Un progrès limité accompli à l'époque par les méthodes indépendantes du fond avait l'air pitoyable en comparaison des grandes avancées accomplies par l'EDQ. Ainsi, jusqu'à la fin des années 1980, la plupart des chercheurs ont préféré une autre voie, à savoir la tentative d'appliquer à la relativité générale les méthodes de l'EDQ. On peut les comprendre. Après la formulation complète de l'EDQ, les scientifiques connaissaient beaucoup de choses sur les théories dépendantes du fond, mais personne n'avait la moindre idée de ce que pouvait être une théorie quantique indépendante du fond, si, du moins, une telle chose existait.

Puisque c'est une voie qui mena à la théorie des cordes, il est utile qu'on la retrace. Le travail des physiciens des années 1930 ayant été oublié, il fallait le redécouvrir. La théorie des gravitons a été développée à nouveau dans la thèse de doctorat de Bryce DeWitt, étudiant de Julian Schwinger à Harvard à la fin des années 1940. À cause de cette découverte et de celles qui ont suivi, DeWitt est considéré aujourd'hui comme l'un des fondateurs de la gravité quantique.

Mais, comme je l'ai déjà dit, il ne suffit pas d'avoir une théorie des gravitons. Celle-ci est efficace à condition que les gravitons se contentent de se déplacer dans l'espace ; pourtant, si c'était tout ce dont ils étaient capables, il n'y aurait pas eu de gravitation et certainement pas non plus de géométrie dynamique et courbe. Il ne s'agissait donc pas de

l'unification de la relativité générale ou de la gravité avec la théorie quantique, mais seulement de l'unification de la théorie quantique avec les ondes gravitationnelles faibles. Les problèmes concernant la théorie des gravitons ont resurgi dans les années 1950, lorsque les chercheurs ont commencé à étudier les interactions entre gravitons. Depuis cette époque et jusqu'au début des années 1980, beaucoup de travaux ont été consacrés à ce problème d'auto-interaction, essentiellement pour lui éviter une contradiction avec la théorie quantique. Parmi eux, aucun n'a abouti.

Il est peut-être utile de s'arrêter là pour réfléchir à la signification humaine de tout ce que je viens de raconter. Il est question de trente années d'un dur et permanent labeur, qui a également exigé beaucoup de calculs compliqués. Imaginez que vous ayez à remplir votre déclaration d'impôt, et ceci tous les jours, du matin au soir, pendant une semaine ; mais que vous n'arriviez toujours pas à faire un calcul correct. Quelque part, il doit y avoir une erreur, mais vous ne parvenez pas à la localiser. Maintenant, imaginez un mois entier passé à ce genre de calculs. Pourriez-vous tenir un an ? Imaginez maintenant vingt ans à ne faire que cela. Et imaginez qu'il y ait au moins quelques dizaines de gens sur terre qui passent ainsi leur temps. Certains sont amis, d'autres rivaux. Ils ont tous leurs propres schémas pour que ça marche, mais tous les schémas ont jusque-là échoué. Pourtant si l'on essaye encore une autre approche légèrement différente, ou si l'on combine deux approches différentes, on pourrait peut-être réussir. Une ou deux fois par an, ces gens participent à des colloques internationaux, où ils présentent aux autres fanatiques leurs tout nouveaux schémas. C'est ainsi qu'était le domaine de la recherche en gravité quantique avant 1984.

Richard Feynman a été parmi les premiers à s'attaquer au problème du graviton. Et pourquoi pas ? Il avait réalisé un tel travail avec l'EDQ ; pourquoi ne pourrait-il pas appliquer les mêmes méthodes à la gravité quantique ? Ainsi, au début des années 1960, il prit pendant quelques mois ses distances avec la physique des particules, pour voir s'il pouvait quantifier la gravité. Pour vous donner une idée du désert qu'était à l'époque le domaine de la gravité quantique, voici une lettre que Feynman a écrite à sa femme, en 1962, à propos d'une réunion à Varsovie où il a présenté son travail :

> Je n'obtiens rien de cette réunion. Je n'apprends rien. Puisqu'il n'y a pas d'expérimentation, ce champ n'est pas un champ actif ; par conséquent, peu parmi les meilleurs des hommes y travaillent. Le résultat en est qu'ici, on trouve des hordes d'imbéciles... et cela ne fait pas du bien à ma pression sanguine. Rappelle-moi de ne plus jamais aller aux colloques sur la gravite[24] !

Néanmoins, Feynman a enregistré des progrès certains et a contribué à éclaircir un aspect technique du problème concernant les probabilités, qui sont des nombres compris entre 0 et 1. Ce qui est certain d'arriver a la probabilité 1 ; par conséquent, la probabilité que se passe quelque chose qui effectivement se passe, quelle que soit cette chose, est égale à 1. Avant que Feynman n'y parvienne, personne n'avait su faire en sorte que les probabilités des différents événements qui peuvent se produire en gravité quantique s'ajoutent pour donner une somme égale à 1. En effet, Feynman n'a réalisé la sommation des probabilités à 1 que dans le premier ordre d'approximation. Quelques années plus tard, Bryce

DeWitt a trouvé le moyen de la réaliser à tous les niveaux. Un an plus tard, la même chose a été trouvée par deux physiciens russes, Ludwig Dmitrievitch Faddéev et Victor Nikolaevitch Popov. Ils ne pouvaient rien connaître du travail de DeWitt, puisque la revue à laquelle il l'avait soumis avait envoyé son article à un expert pour connaître son avis, et cet expert a pris plus d'un an pour répondre. Ainsi, peu à peu, les chercheurs ont pu résoudre certains problèmes. Pourtant, même si la somme des probabilités était enfin égale à 1, la théorie des gravitons, dans sa globalité, n'a jamais abouti.

Il y a eu quelques aspects positifs dans ce travail. La même méthode a pu être appliquée aux théories de Yang-Mills, sur lesquelles est fondé le modèle standard. En conséquence, au moment où Steven Weinberg et Abdus Salam ont utilisé ces théories pour unifier les interactions faibles et électromagnétiques, une technique était mise au point pour faire des calculs réels. Les résultats étaient bien meilleurs qu'en gravité quantique. Comme le théoricien hollandais Gerard 't Hooft l'a finalement prouvé en 1971, les théories de Yang-Mills étaient très sensées en tant que théories quantiques. En effet, comme les autres avant lui, 't Hooft étudiait les théories de Yang-Mills en partie comme un exercice d'échauffement avant de s'attaquer à la gravité quantique. Les trente ans de travail sur la gravité quantique n'étaient donc pas complètement perdus ; au moins, elles ont permis de donner un sens à la physique des particules.

Pourtant, on ne trouvait aucun moyen de sauver la gravité quantique. Les chercheurs ont essayé toute sorte de méthodes d'approximation. Puisque le modèle standard de la physique des particules était sensé, on a développé de nombreuses méthodes pour sonder ses diverses caractéristiques. Une par une, toutes ces méthodes ont été appliquées au problème de la gravité quantique. Aucune n'a réussi. Quelle que soit la façon dont on organisait la théorie quantique des ondes gravitationnelles, dès qu'on y introduisait l'interaction des ondes entre elles, des quantités infinies apparaissaient. Quel que soit le chemin emprunté pour contourner l'obstacle, il n'y avait aucun moyen de faire disparaître les infinis. Encore plus d'années de travail, plus d'articles, de thèses, d'exposés aux colloques : la situation n'évoluait pas. Finalement, en 1974, il est devenu clair que l'approche dépendante du fond du problème de fusion de la relativité générale avec la théorie quantique n'avait pas de sens.

Pourtant, une chose pouvait encore être tentée avec les méthodes dépendantes du fond. Au lieu de simplement essayer de quantifier la gravitation et de comprendre ainsi l'effet de la théorie quantique sur les ondes gravitationnelles, on pouvait retourner le problème et se demander quels effets la gravité pouvait avoir sur les phénomènes quantiques. Pour ce faire, il fallait étudier les particules quantiques en mouvement dans les espaces-temps où la gravité est importante, comme dans les trous noirs ou dans l'univers en expansion. À partir des années 1960, il y eut de grandes avancées dans cette direction. Certaines des découvertes faites dans cette voie ont mené aux problèmes que les approches postérieures, comme la théorie des cordes, se sont donnés comme mission de résoudre.

Le premier succès a été de prédire que lorsque le champ gravitationnel varie rapidement dans le temps, cela crée des particules élémentaires. Cette idée a pu être appliquée à

l'origine de l'univers, quand celui-ci était en pleine expansion, menant à des prédictions encore utilisées aujourd'hui dans l'étude des stades premiers de la vie de l'univers.

Le succès de ces calculs a poussé quelques physiciens à essayer quelque chose de plus difficile – à savoir, étudier l'effet produit par un trou noir sur les particules et les champs quantiques. Le défi est qu'une certaine région des trous noirs a une géométrie en évolution rapide, et que cette région est cachée derrière un horizon. L'horizon d'un trou noir est une feuille de lumière qui ne bouge pas. Il marque la frontière entre la région intérieure, depuis laquelle toute lumière est tirée vers le centre du trou noir et le monde extérieur. Ainsi, la lumière ne peut pas s'échapper de la région qui se trouve derrière l'horizon. De l'extérieur, le trou noir paraît statique, mais juste à l'intérieur de son horizon se trouve une région où tout est tiré vers des champs gravitationnels de plus en plus forts. Cela aboutit à quelque chose de singulier, où tout est infini et où le temps s'arrête.

Le premier résultat majeur, reliant la théorie quantique aux trous noirs, a été obtenu en 1973 par Jacob Bekenstein, un jeune étudiant israélien de John Archibald Wheeler à Princeton. Il a fait une découverte incroyable : les trous noirs possèdent une entropie. L'entropie est la mesure du désordre, et il existe une loi célèbre, qui s'appelle « second principe de la thermodynamique », selon laquelle l'entropie d'un système fermé ne peut jamais décroître. Bekenstein s'est inquiété du fait que, si l'on prend une boîte remplie de gaz chaud – avec beaucoup d'entropie, puisque le mouvement des molécules de gaz est aléatoire et désordonné –, et si l'on jette cette boîte dans un trou noir, alors l'entropie de l'univers devrait diminuer, parce le gaz ne pourra plus être récupéré. Pour sauver le second principe, Bekenstein a avancé que le trou noir possède une entropie qui pourrait augmenter lorsque la boîte de gaz tombe dedans, de telle sorte que l'entropie totale du système ne diminuera jamais. En développant quelques exemples simples, Bekenstein a pu montrer que l'entropie du trou noir doit être proportionnelle à l'aire de l'horizon qui l'entoure.

Cela a donné naissance à un mystère. L'entropie est la mesure de l'aléatoire, et le mouvement aléatoire est la chaleur. Par conséquent, n'est-il pas nécessaire qu'un trou noir ait aussi une température ? Un an plus tard, en 1974, Stephen Hawking a pu montrer qu'en effet, le trou noir a aussi une température. Il a également su calculer le coefficient de proportionnalité entre l'aire de l'horizon du trou noir et son entropie.

Il y a un autre aspect concernant la température des trous noirs prédit par Hawking qui sera important dans une discussion que nous mènerons plus loin. Cet aspect est que la température d'un trou noir est inversement proportionnelle à sa masse. Cela signifie que les trous noirs se comportent très différemment des objets qui nous sont familiers. Pour réchauffer quelque chose, il faut lui donner de l'énergie. On *allume* un feu. Les trous noirs se comportent de manière opposée. Si l'on y ajoute de l'énergie ou de la masse, le trou noir devient plus lourd – et, en conséquence, il se refroidit[25].

Ce mystère a depuis été un défi formidable dans toute tentative de construire une théorie de la gravitation : comment fait-on pour expliquer l'entropie et la température des trous noirs à partir des premiers principes ? Bekenstein et Hawking ont traité le trou noir comme un fond classique fixe, sur lequel se déplacent les particules, et leurs arguments ont été fondés sur la condition de cohérence avec les lois déjà connues. Ils n'ont pas décrit le

trou noir en tant que système quantique, simplement parce qu'on ne le pourrait que dans un cadre défini par une théorie quantique de l'espace-temps. Par conséquent, le défi de toute théorie quantique de la gravitation est de fournir une interprétation approfondie de l'entropie de Bekenstein et de la température de Hawking.

L'année suivante, Hawking a mis au jour un autre mystère qui se cachait déjà dans ses résultats. Puisque le trou noir a une température, il doit émettre de la radiation comme tout autre corps chaud. Mais la radiation transporte avec elle une énergie. Donc, il exite un flux d'énergie depuis le trou noir. Lorsqu'assez de temps passe, toute la masse du trou noir se transforme en radiation. Puis, lorsque le trou noir perd son énergie, il devient plus léger. Et à cause de la propriété que je viens de décrire – à savoir quand il devient plus léger, il se réchauffe –, il émet la radiation de plus en plus rapidement. À la fin du processus, le trou noir diminuera jusqu'à la masse de Planck, et la théorie quantique de la gravitation sera sans doute nécessaire pour prédire quel sera son destin ultime.

Mais quel que soit l'état final d'un trou noir, il semble qu'un autre mystère surgisse concernant l'information. Pendant la vie du trou noir, celui-ci attire une énorme quantité de matière, qui porte, elle, des quantités encore plus énormes d'information. À la fin, il ne reste que beaucoup de radiation très chaude – qui, étant aléatoire, ne porte pas d'information du tout – et encore un minuscule trou noir. L'information initiale a-t-elle simplement disparu ?

C'est un mystère pour la gravité quantique, parce qu'en mécanique quantique, il existe une loi qui interdit la destruction de l'information. La description quantique du monde est supposée exacte, et il existe un résultat qui implique, lorsqu'on tient compte de tous les détails, que l'information n'est jamais perdue. Hawking a avancé un argument fort qui explique que le trou noir en évaporation perd de l'information. Cela semble contredire la théorie quantique ; en conséquence, il a appelé son argument « paradoxe de l'information » des trous noirs. Tout candidat à la théorie quantique de la gravitation doit proposer une solution à ce paradoxe.

Ces découvertes des années 1970 sont des bornes sur le chemin de la théorie de la gravité quantique. Depuis, nous mesurons le succès d'une approche nouvelle de la gravité quantique en partie par sa capacité à répondre aux défis posés par l'entropie, la température et la perte de l'information dans les trous noirs.

À peu près à la même époque, une théorie a finalement été proposée, qui semblait marcher ; au moins, sur l'instant. Elle consistait en l'application des idées de la supersymétrie à la gravitation. Le résultat s'appelait « supergravité ».

J'étais présent à l'une des premières présentations faite de cette nouvelle théorie. C'était un colloque, en 1975, à Cincinnati, sur les développements en relativité générale. J'étais encore élève à Hampshire College, mais j'y suis allé dans l'espoir d'apprendre à quel genre de questions les gens s'intéressaient. Je me souviens de quelques exposés d'une grande élégance faits par Robert Geroch de l'université de Chicago, qui était à l'époque la star du domaine, c'est-à-dire des mathématiques des espaces infinis. Le public l'a ovationné suite à une démonstration particulièrement élégante. Puis, relégué en fin du colloque, il y avait un exposé d'un jeune post-doc du nom de Peter van Nieuwenhuizen. Je me rappelle qu'il

était assez nerveux. Il a commencé son exposé en disant qu'il était venu au colloque pour introduire une nouvelle théorie de la gravitation. Je lui apportai toute mon attention.

Selon van Nieuwenhuizen, sa théorie était fondée sur la supersymétrie, à l'époque une idée récente pour unifier les bosons et les fermions. Les particules qu'on obtient en quantifiant le champ gravitationnel s'appellent gravitons, et ce sont des bosons. Mais pour que le système ait une supersymétrie, il faut qu'il possède à la fois des bosons et des fermions. La relativité générale n'avait pas de fermions, alors il fallait en créer par hypothèse, pour fournir des superpartenaires aux gravitons. « Sgravitons » n'étant pas un mot facile à prononcer, ces superpartenaires ont reçu le nom de *gravitinos*.

Puisque le gravitino n'a jamais été observé, a dit van Nieuwenhuizen, nous avons la liberté d'inventer des lois auxquelles il obéit. Pour que la théorie soit symétrique sous la supersymétrie, les forces ne doivent pas changer lorsqu'on substitue les gravitinos aux gravitons. Cela soumet déjà les lois à beaucoup de contraintes, et la recherche de solutions à ces contraintes demande des semaines de calculs extrêmement pénibles. Deux groupes de chercheurs les ont terminés presque simultanément. Van Nieuwenhuizen faisait partie de l'un de ces groupes ; dans l'autre était mon futur directeur de thèse à Harvard, Stanley Deser, qui travaillait avec l'un des inventeurs de la supersymétrie, Bruno Zumino.

Van Nieuwenhuizen a aussi évoqué une façon plus approfondie de penser la théorie. On commence par penser aux symétries de l'espace et du temps. Les propriétés de l'espace ordinaire restent inchangées si l'on se tourne dans une autre direction, parce qu'il n'y a pas de direction privilégiée. Elles restent aussi constantes si l'on se déplace d'un endroit à un autre, parce que la géométrie de l'espace est uniforme. Ainsi, les translations et les rotations sont des symétries de l'espace. Rappelez-vous qu'au chapitre 4, j'ai expliqué le principe de jauge, selon lequel, dans certaines circonstances, une symétrie peut dicter les lois auxquelles satisfont les forces. On peut appliquer ce principe aux symétries de l'espace et du temps. Le résultat en est précisément la théorie générale de la relativité d'Einstein. Ce n'est pas la façon dont Einstein a trouvé sa théorie, mais s'il n'y avait pas eu d'Einstein, c'est de cette façon que la relativité générale aurait pu être découverte.

Van Nieuwenhuizen a expliqué qu'on pouvait traiter la supersymétrie comme un approfondissement des symétries de l'espace. Cet énoncé tient grâce à une propriété profonde et élégante : si l'on remplace tous les fermions par des bosons et si on les remplace ensuite, à l'envers, par des fermions, on obtient exactement le même monde que celui où l'on était avant, sauf que toutes les choses seront un peu déplacées dans l'espace. Je ne peux pas expliquer ici pourquoi ceci est vrai, mais il nous suggère que la supersymétrie est, de quelque manière, fondamentalement liée à la géométrie de l'espace. En conséquence, si l'on applique le principe de jauge à la supersymétrie, le résultat en sera une théorie de la gravitation : la supergravité. De ce point de vue, la supergravité est un approfondissement de la relativité générale.

J'étais nouveau dans ce domaine, débarquant juste à un premier colloque. Je ne connaissais personne et, par conséquent, je ne savais pas à quoi m'attendre concernant les réponses de l'auditoire à l'exposé de van Nieuwenhuizen ; il m'avait cependant fait forte impres-

sion. Je suis revenu chez moi pensant que c'était une bonne chose que cet homme soit nerveux, parce que, si ce qu'il avait raconté était exact, ce serait une découverte capitale.

Pendant ma première année de troisième cycle à l'université, j'ai suivi le cours de Stanley Deser sur la nouvelle théorie de supergravité. Je m'y intéressais et j'ai commencé à y réfléchir moi-même, sans parvenir à l'appréhender. Qu'est-ce que signifiait la théorie ? Que voulait-elle nous dire ? Je suis devenu ami avec un autre étudiant, du nom de Martin Rocek, et il était aussi très excité par cette nouvelle théorie. Rapidement, il est rentré en contact avec Peter van Nieuwenhuizen, qui était à Stony Brook, et a commencé à collaborer avec lui et avec ses étudiants. Stony Brook n'était pas très loin, et Martin m'y a amené lors de l'une de ses visites. Les choses étaient en train de décoller et de prendre de l'importance, et il voulait m'offrir l'occasion de les saisir au vol. C'est comme si l'on vous proposait votre premier emploi chez Microsoft ou chez Google. Rocek, van Nieuwenhuizen et beaucoup de ceux que j'ai rencontrés à travers eux, ont fait de brillantes carrières en travaillant sur la supersymétrie et la supergravité. Je suis sûr que, de leur point de vue, j'ai agi comme un idiot en ratant une occasion aussi extraordinaire.

Pour moi (et pour d'autres, j'en suis sûr), la fusion de la supersymétrie avec la théorie de l'espace et du temps soulevait des questions importantes. J'avais appris la relativité générale en lisant Einstein, et si j'avais compris quelque chose, c'était la façon dont cette théorie s'y prenait pour fusionner la gravitation avec la théorie de l'espace et du temps. Cette idée m'avait pénétré. Maintenant, on était en train de me dire qu'un autre aspect essentiel de la nature était aussi unifié avec l'espace et le temps : à savoir, le fait qu'il existe des bosons et des fermions. Mes amis me le disaient, et les équations aussi. Mais ni mes amis ni les équations ne m'ont dit ce que cela signifiait. Il me manquait l'idée même, le concept de la chose. Quelque chose dans ma façon de comprendre l'espace, le temps, la gravité et ce que voulait dire « être un fermion ou un boson » devait être approfondi à la suite de cette unification. Non pas les mathématiques, mais ma conception même de la nature devait changer. Mais elle n'a pas changé. Ce que j'ai trouvé quand j'ai rencontré le groupe d'étudiants de van Nieuwenhuizen, n'était qu'un groupe de gamins très intelligents et branchés sur la technique, qui, jour et nuit, calculaient avec frénésie. Ce qu'ils étaient en train de faire, était d'inventer des versions nouvelles de la supergravité. Chaque version possédait un ensemble plus grand de symétries que la précédente, en unifiant une famille plus nombreuse de particules. Ils œuvraient pour une théorie ultime, qui devait unifier toutes les particules et toutes les forces avec l'espace et le temps. Cette théorie n'avait qu'un nom technique, « théorie N = 8 », N étant le nombre de différentes façons de croiser les fermions et les bosons. La première théorie – celle à laquelle van Nieuwenhuizen et Deser m'avaient initié – était la plus simple : N = 1. Certains chercheurs en Europe ont réussi le cas N = 2. La semaine où j'étais à Stony Brook, ceux que j'ai rencontrés travaillaient sur N = 4 et sur la voie menant éventuellement à N = 8.

Ils travaillaient jour et nuit, se faisaient livrer leur repas et supportaient les vicissitudes du travail avec la certitude vertigineuse qu'ils poursuivaient quelque chose de nouveau, qui changerait le monde. L'un d'eux m'a dit qu'il travaillait le plus vite possible parce qu'il était sûr que quand le monde apprendrait avec quelle facilité nous pouvons créer de nou-

velles théories, tout ce domaine d'étude serait envahi. Si je me rappelle bien, ce groupe d'étudiants a résolu le cas N = 4, mais est resté bloqué à N = 8.

Ce qu'ils étaient en train de faire ne me semblait pas facile. Les calculs étaient longs et compliqués au point de paralyser le cerveau lui-même. Ils demandaient une précision absolue : si un facteur 2 manquait quelque part, des semaines entières de travail étaient perdues. Chaque ligne de calculs avait des dizaines de termes. Pour que les calculs tiennent sur le papier, ils utilisaient des feuilles de plus en plus grandes. Bientôt ils ont commencé à travailler sur de grands carnets d'artistes, les plus grands qu'ils avaient trouvés. Ils couvraient chaque page d'une écriture minuscule et précise. Chaque carnet représentait des mois de travail. Le mot « monastique » me vint à l'esprit. J'étais terrifié. Je suis resté une semaine sur place, puis j'ai fui.

Pendant des décennies, mes relations avec Peter, Martin et les autres n'ont pas été très bonnes. J'ai dû être considéré comme un *loser* pour avoir ainsi quitté le navire alors qu'ils m'offraient la possibilité de les rejoindre dans leur tentative de faire fonctionner la supergravité. Si j'étais resté avec eux, j'aurais peut-être été bien placé pour devenir un des leaders de la théorie des cordes. Au lieu de cela, je suis parti dans ma propre direction ; peut-être même ai-je aidé à découvrir une approche différente du problème de la gravité quantique, ce qui est pire encore je ne me suis pas contenté d'être un *loser* qui a abandonné la vraie foi, je suis un *loser* devenu rival.

Lorsque je pense aux carrières scientifiques des chercheurs que j'ai connus ces trente dernières années, il me paraît de plus en plus évident que chaque décision de carrière dépend du caractère de chacun. Certains trouveront leur bonheur en sautant dans le train de la mode ; ils lui donneront tout ce qu'ils pourront, et de cette façon ils feront des contributions importantes aux disciplines en développement rapide. D'autres n'ont pas ce tempérament. Il y a des gens qui ont besoin de réfléchir en détail sur tout, et cela prend du temps puisqu'ils peuvent être facilement déconcertés. Il n'est pas difficile de se sentir bien supérieur à ces personnes ; jusqu'au moment où vous vous souvenez qu'Einstein était comme eux. Selon mon expérience, les innovations véritablement étonnantes viennent de ce groupe. Pourtant, il existe encore un troisième groupe de chercheurs – et j'y appartiens : ceux qui poursuivent leur propre chemin et qui fuiront les domaines porteurs pour la simple raison qu'ils n'aiment pas que quelqu'un rejoigne un domaine de recherche parce qu'il a le sentiment de passer du côté des vainqueurs. Ainsi, je ne suis plus inquiet, comme autrefois, quand je m'oppose à ce que font les autres, car je crois que le tempérament de chacun détermine plus ou moins quelle sorte de science il produira. Heureusement pour la science, elle a besoin des contributions de tous. Ceux qui font de la bonne science, je le crois maintenant, sont ceux qui choisissent des problèmes à leur mesure.

Mais si j'avais fui le groupe de la supergravité de Stony Brook, je ne m'étais pas désintéressé de la supergravité pour autant. Au contraire, je m'y suis plongé plus que jamais. J'étais sûr qu'ils allaient trouver quelque chose, mais je ne pouvais pas les suivre sur le chemin qu'ils avaient pris. Je comprenais la théorie générale de la relativité d'Einstein ; je savais démontrer chacune de ses propriétés essentielles sur une seule page ou moins, remplie de calculs concis et transparents. Il me semblait que lorsqu'on comprend vraiment

une théorie, vérifier ses caractéristiques fondamentales ne devrait pas nécessiter des semaines de calculs dans de grands carnets d'artistes.

J'ai formé une équipe avec un autre étudiant de troisième cycle – un ami de Hampshire College, John Dell, alors à l'université du Maryland. Nous voulions comprendre plus profondément les implications de la supersymétrie comme partie de la géométrie de l'espace et du temps. John trouva quelques articles d'un mathématicien nommé Bertram Kostant sur un nouveau type de géométrie qui étendait les techniques mathématiques utilisées par Einstein en leur ajoutant des propriétés nouvelles, qui avaient l'air de se comporter un peu comme les fermions. Nous avons écrit les équations de la relativité générale dans ce nouveau contexte et de là sont nées certaines des équations de la supergravité. Nous avons publié notre premier article scientifique.

À peu près au même moment, d'autres développaient l'approche alternative de la géométrie de la supergravité, appelée « supergéométrie ». J'ai eu le sentiment à l'époque (et je l'ai toujours) que leur construction était moins belle que la nôtre. Elle était beaucoup plus compliquée, mais elle fonctionnait beaucoup mieux. Elle a favorisé la simplification partielle des calculs, de façon appréciable. Quoi qu'il en soit, la supergéométrie a pris les devants, et notre travail fut oublié. John et moi ne nous en sommes pas souciés car aucune de ces deux approches ne nous donnait ce que nous attendions. Les mathématiques marchaient bien, mais elles ne menaient à aucune percée conceptuelle. Aujourd'hui encore, je ne pense pas que quelqu'un comprenne réellement ce que signifie la supersymétrie, ni ce qu'elle dit de fondamental à propos de la nature – si toutefois elle est vraie.

Plusieurs années après, je peux enfin formuler complètement ce qui motiva mon abandon de la supergravité dans ses premières années. Ayant étudié la physique d'après la lecture des textes originaux d'Einstein, j'ai appris à reconnaître la manière de penser qui peut mener tout droit aux nouvelles unifications révolutionnaires de la physique. Ce à quoi je m'attendais était que l'unification commence par un principe essentiel, comme celui d'inertie ou celui d'équivalence. À partir de ce principe se ferait une nouvelle avancée profonde et surprenante, réunissant, dans une entité unique, deux choses qui, jusque-là, étaient sans relation. L'énergie est la masse. Le mouvement et le repos ne sont pas distinguables. L'accélération et la gravité sont la même chose.

La supergravité ne l'a pas démontré. Bien qu'elle soit, en effet, une proposition pour une unification nouvelle, elle ne pouvait être exprimée et vérifiée que par des calculs ennuyeux et épuisants pour l'esprit. Je pouvais faire les calculs mathématiques nécessaires, mais ce n'était pas cette façon de faire de la science que j'avais apprise en lisant Einstein et d'autres maîtres.

À l'époque, j'ai rencontré un autre ami, Kellogg Stelle, un peu plus âgé que moi et étudiant de Stanley Deser lui aussi. Ensemble, ils exploraient la question de savoir si la supergravité se comportait mieux que la relativité générale une fois fusionnée avec la théorie quantique. Puisqu'il n'y avait pas encore de progrès concernant les méthodes indépendantes du fond, ils utilisaient, comme tous les autres, une méthode dépendante du fond, celle qui avait échoué si pitoyablement quand on l'avait appliquée à la relativité générale. Ils ont vite démontré que la méthode marchait mieux pour la supergravité. Ils ont vérifié le pre-

mier endroit où l'infini avait surgi dans la relativité générale quantifiée et ils y ont trouvé un nombre fini.

C'était une bonne nouvelle : la supersymétrie avait véritablement permis d'améliorer la situation ! Mais notre joie fut de courte durée. Après quelques mois de travail, Deser et Stelle étaient persuadés que les infinis resurgiraient plus loin dans la supergravité. Les calculs en question étaient trop difficiles, même au prix de milliers de lignes d'écritures dans des carnets d'artistes, mais ils avaient trouvé le moyen de déterminer si, au final, les résultats étaient finis ou infinis. Et il s'est avéré que tous les résultats plus précis que celui qu'ils avaient vérifié au début – qui, lui, était fini – seraient en fait infinis.

Ce n'était pas terminé pour autant. Il restait d'autres versions de la supergravité à tester. Peut-être l'une d'entre elles produirait-elle une théorie quantique cohérente ? L'une après l'autre, toutes ces formes furent étudiées, chacune un peu plus finitaire, de sorte qu'il fallait aller plus loin encore dans la séquence des approximations avant que le test n'échoue. Bien que les calculs fussent trop difficiles pour être réellement menés, il n'y avait aucune raison de croire qu'une des réponses, au-delà de ce point crucial, pouvait être finie. Il restait un peu d'espoir que la théorie ultime, la fameuse N = 8, soit différente. Finalement, celle-ci a fini par être construite à Paris, après un travail héroïque. Mais elle aussi a raté le test, bien que quelques espoirs subsistent à son sujet.

La supergravité a été, et reste, une théorie formidable. Mais, à elle seule, elle n'est pas capable de résoudre le problème de la gravité quantique.

Ainsi, au début des années 1980, aucun progrès n'était enregistré dans la construction de la théorie de la gravité quantique. On avait tout essayé, et toutes les tentatives avaient échoué. Alors que les théories de jauge triomphaient l'une après l'autre, le domaine de la gravité quantique, lui, stagnait. Ceux parmi nous qui insistions sur la nécessité de réfléchir sur la gravité quantique, nous sentions comme des élèves ayant abandonné leurs études au lycée et qui auraient été invités à assister à la cérémonie de remise des diplômes de leurs frères et sœurs à Harvard, ceux-ci recevant, chacun, simultanément, des diplômes en médecine, neurobiologie et histoire de la danse dans l'Inde ancienne.

L'échec de la supergravité d'aboutir à une bonne théorie de la gravité quantique nous avait déprimés, mais il fut libérateur. Nous avions passé en revue toutes les idées simples. Pendant des décennies, nous avons tenté d'étendre la théorie par les méthodes de Feynman et de ses amis. Il ne restait plus que deux choses à faire : abandonner les méthodes fondées sur la géométrie d'un fond fixe, ou abandonner l'idée que les choses qui se déplacent sur ce fond géométrique sont des particules. Les deux approches allaient bientôt être explorées ; toutes les deux produiront – pour la première fois – des avancées spectaculaires sur la voie de la gravité quantique.

II

Une brève histoire de la théorie des cordes

7
Préparations pour une révolution

Parfois le progrès scientifique cale en raison d'une absence. Un élément manque, un truc qu'il faut encore inventer. Alors, quel que soit l'effort consenti, on ne trouvera jamais la réponse. Jusqu'à ce que quelqu'un, de quelque façon, tombe sur le lien manquant.

Ce fut le cas avec les éclipses, pour la première fois peut-être. Étant donné le drame que devaient vivre les hommes à la vue d'un soleil qui brusquement se voile, la première tâche des astronomes d'antan fut de prédire ces événements qui causaient tant de frayeur. Pendant des millénaires, ils collationnèrent les informations sur les éclipses et les mouvements du Soleil, de la Lune et des planètes. Ils réalisèrent vite que les mouvements du Soleil et de la Lune étaient périodiques ; aujourd'hui, des preuves archéologiques attestent que des hommes connaissaient ces régularités alors qu'ils habitaient des cavernes. Pourtant, les éclipses furent bien plus difficiles à expliquer.

Peu de chose était compréhensible pour les astronomes d'antan. Les éclipses se produisent lorsque le Soleil et la Lune, qui suivent des trajectoires différentes à travers le ciel, se rencontrent. Leurs chemins s'entrecroisent en deux points. Pour qu'il y ait une éclipse, le Soleil et la Lune doivent se rencontrer en l'un de ces points. Par conséquent, prédire les éclipses nécessite de collecter des données sur la trajectoire annuelle du Soleil et sur la trajectoire mensuelle de la Lune. Suivez simplement ces trajectoires et déterminez le moment où les deux corps se rencontrent. Vous devriez trouver un motif qui se répète à intervalles réguliers, proportionnels à la période lunaire de vingt-neuf jours et demi.

De façon surprenante, ce n'est pas le cas : les éclipses ne répondent pas au modèle donné par le mois lunaire. On peut facilement s'imaginer les générations entières de théoriciens qui ont essayé de réconcilier le mouvement des deux grands corps célestes et qui ont échoué. Pour eux, il s'agissait donc d'une énigme majeure, tout comme concilier la relativité générale et la théorie quantique l'est pour nous.

Nous ne savons pas qui fut le premier à comprendre qu'il manquait un élément, mais qui que soit cette personne, nous lui devons beaucoup. On peut imaginer un astronome, peut-être à Babylone ou en Égypte, qui brusquement a compris qu'il fallait considérer non pas deux mouvements périodiques, mais trois. C'était peut-être un sage, qui, après des décennies d'étude des données, les connaissait par cœur. Ou peut-être était-ce un jeune

rebelle qui n'avait pas encore subi le lavage de cerveau consistant à imposer la croyance que tout doit s'expliquer seulement à l'aide des objets observables. Quoi qu'il en soit, cet innovateur a découvert une mystérieuse troisième oscillation dans les données, qui advient non pas une fois par mois, ni une fois par an, mais à peu près tous les dix-huit ans et deux tiers. Il s'avère que les points où les deux trajectoires se rencontrent ne sont pas fixes : ils tournent aussi, et il leur faut ces dix-huit ans et deux tiers pour accomplir un cycle complet.

La découverte de ce troisième mouvement – l'élément manquant – a dû être l'un des premiers triomphes de la pensée abstraite. Seuls deux objets sont visibles : le Soleil et la Lune. Chacun a une période, connue depuis la nuit des temps. Mais il a fallu faire acte d'imagination pour comprendre qu'autre chose était aussi en mouvement, les trajectoires elles-mêmes. C'était un pas en avant essentiel de déduire ainsi l'existence d'autres mouvements derrière le mouvement observé. Depuis cette découverte, la science n'a que très peu de fois progressé par la découverte d'un tel élément manquant.

L'idée que les particules élémentaires ne sont pas des points, mais des vibrations de cordes, pourrait être une autre de ces intuitions rarissimes. Elle donne une réponse plausible à quelques grands problèmes de physique. Si elle est vraie, ce sera une découverte aussi essentielle que celle des anciens qui les premiers surent que les cercles sur lesquels se déplacent les planètes sont eux-mêmes en mouvement.

L'invention de la théorie des cordes a été qualifiée de révolution scientifique, mais cette révolution était en préparation depuis bien longtemps. Comme dans le cas de certaines révolutions politiques – mais pas comme dans celui des révolutions scientifiques du passé –, la révolution de la théorie des cordes a été anticipée par une petite avant-garde, qui a travaillé dur pendant des années dans un relatif isolement. Ces scientifiques ont commencé leur recherche à la fin des années 1960, d'abord par l'exploration de ce qui se passait quand les particules à interaction forte – c'est-à-dire, les particules faites de quarks, comme les protons et les neutrons, et donc gouvernées par les interactions nucléaires fortes – se diffusaient les unes sur les autres. Ce problème n'appartient pas aux cinq grands problèmes, car aujourd'hui, avec le modèle standard, on sait quelle réponse lui apporter, au moins en principe. Mais avant l'invention du modèle standard, c'était un problème central pour les théoriciens des particules élémentaires.

À part les protons et les neutrons, il existe beaucoup d'autres particules constituées de quarks. Celles-ci sont instables ; elles sont produites dans des accélérateurs en envoyant un rayon de protons à haute énergie dans d'autres protons. Entre 1930 et 1960, nous avons accumulé de nombreuses données sur les différents types de particules à interaction forte, et sur ce qui advenait dans les collisions.

En 1968, un jeune physicien italien du nom de Gabriele Veneziano a trouvé un modèle intéressant dans ces données. Il l'a décrit à l'aide d'une formule, qui concernait les probabilités pour deux particules de se séparer après collision à des angles différents. La formule de Veneziano correspondait de façon étonnante aux données expérimentales[1].

Elle a attiré l'attention de quelques-uns de ces collègues, en Europe et aux États-Unis, qui ont essayé de la comprendre. En 1970, certains ont pu l'interpréter en termes d'image

physique concrète. Suivant cette image, les particules ne doivent plus être perçues comme des points, comme elles l'avaient toujours été. Au contraire, elles étaient *comme des cordes*, existant en une seule dimension, et on pouvait les étirer comme des élastiques. Quand elles recevaient de l'énergie, elles se contractaient – aussi comme des élastiques. Et tout comme ceux-ci, elles pouvaient aussi vibrer.

La formule de Veneziano était ainsi une porte ouverte sur un monde où les particules à interaction forte étaient toutes des élastiques, qui vibraient lorsqu'ils se déplaçaient, qui entraient en collision entre eux et échangeaient de l'énergie. Les différents états de vibration correspondaient aux différents types de particules produites dans les expériences de collisions de faisceaux de protons.

Cette interprétation de la formule de Veneziano a été développée indépendamment par Yoichiro Nambu à l'Université de Chicago, Holger Nielsen à l'Institut Niels-Bohr et par Leonard Susskind, qui est maintenant à l'Université Stanford. Chacun a cru avoir accompli quelque chose de fascinant, mais leur travail n'a suscité que peu d'intérêt. L'article de Susskind a été rejeté par la *Physical Review Letters*. La raison donnée par la revue était que le résultat n'était pas assez significatif pour être publié. Comme Susskind l'a raconté dans un entretien, beaucoup plus tard : « Boom ! Je me sentais comme si j'avais été frappé sur la tête avec une poubelle, et j'étais très, très profondément vexée[2]. »

Mais quelques chercheurs comprirent le sens de ce travail et commencèrent à travailler sur son interprétation. La théorie qui en découla aurait pu s'appeler « théorie des élastiques », mais puisqu'il manquait à ce nom la dignité nécessaire, la « théorie des cordes » a vu le jour.

En tant que théorie des particules à interaction forte, la théorie des cordes a été bientôt remplacée par le modèle standard. Mais cela ne signifie pas que les théoriciens des cordes avaient tort ; en fait, les particules à interaction forte se comportent réellement, en grande partie, comme des cordes. Comme je l'ai dit au chapitre 4, la force entre les quarks est désormais décrite, plus fondamentalement, par le champ de jauge, et la nouvelle loi de base en est donnée par la chromodynamique quantique, ou CDQ, qui fait partie du modèle standard. Mais dans des circonstances particulières, on peut également décrire ce résultat comme s'il existait des élastiques entre les quarks. Cela est vrai parce que les interactions nucléaires fortes ne ressemblent pas du tout aux interactions électromagnétiques. Alors que celles-ci deviennent plus faibles lorsque la distance augmente, celles-là tendent vers une force constante lorsque l'on sépare deux quarks, force qui reste ensuite constante quelle que soit la distance entre les quarks. C'est la raison pour laquelle on ne voit jamais de quarks libres dans une expérience d'accélérateur, mais seulement des particules faites de quarks liés. Pourtant, quand les quarks sont très près l'un de l'autre, la force entre eux s'affaiblit. Ceci est un point important. L'image de la corde (ou de l'élastique) ne fonctionne correctement que si les quarks sont à une bonne distance l'un de l'autre.

Au début, les théoriciens des cordes n'avaient pas pensé à cela. Ils s'imaginaient un monde où les quarks étaient liés par des élastiques, et rien d'autre ; c'est-à-dire qu'ils voulaient faire de la théorie des cordes une théorie fondamentale, et non pas une approximation de quelque chose de plus profond. Quand ils essayèrent de comprendre les cordes en

tant que cordes, ils se heurtèrent à un problème provenant de deux conditions raisonnables imposées à la théorie : premièrement, la théorie des cordes devait être cohérente avec la théorie restreinte de la relativité d'Einstein – c'est-à-dire devait respecter la relativité du mouvement et la constance de la vitesse de la lumière ; deuxièmement, elle devait être cohérente avec la théorie quantique.

Quelques années de travail plus tard, il fut démontré qu'en tant que théorie fondamentale, la théorie des cordes ne pouvait être cohérente avec la relativité restreinte et la théorie quantique qu'au prix de quelques conditions supplémentaires. Premièrement, le monde devait avoir vingt-cinq dimensions spatiales. Deuxièmement, il fallait qu'existe le *tachyon* – une particule qui se déplace plus vite que la lumière. Troisièmement, il devait y avoir des particules qu'on ne peut pas mettre au repos. On s'y réfère comme à des *particules sans masse*, parce que la masse est la mesure de l'énergie des particules lorsque celles-ci sont au repos.

Or il semble bien que le monde ne comporte pas vingt-cinq dimensions spatiales. Que la théorie n'ait pas été abandonnée après que l'on a fait ce constat demeure une des grandes énigmes de la science. Il est certain toutefois que cette nécessité d'avoir des dimensions supplémentaires a troublé beaucoup de physiciens et les a empêchés de prendre au sérieux la théorie des cordes avant 1984. Beaucoup dépend de qui a raison : les chercheurs qui rejetaient l'idée des dimensions supplémentaire avant 1984, ou ceux qui se sont laissés convaincre de leur existence.

Les tachyons posaient eux aussi problème. On ne les avait jamais vus ; même pire, leur présence signalait que la théorie était instable et, assez probablement, incohérente. De plus, c'est aussi un fait expérimental qu'il n'existe pas de particules à interaction forte sans masse, et, par conséquent, la théorie a échoué en tant que théorie des particules à interaction forte.

Trois des quatre problèmes ont été résolus d'un seul coup. En 1970, le théoricien Pierre Ramond a trouvé une manière de modifier les équations qui régissent les cordes, de telle façon qu'elles puissent inclure les fermions[3]. Il a démontré que la théorie ne peut être cohérente que si elle possède une nouvelle symétrie. Cette symétrie devrait mélanger les nouvelles particules avec les anciennes, c'est-à-dire les bosons avec les fermions. C'est ainsi que Pierre Ramond a découvert la supersymétrie ; quel que soit le destin futur de la théorie des cordes, elle fut l'une des façons de parvenir à la supersymétrie et, par conséquent, en tant qu'incubateur d'idées nouvelles, elle a déjà prouvé son utilité.

La nouvelle théorie supersymétrique des cordes a, en même temps, résolu deux problèmes antérieurs. Dans cette nouvelle théorie, il n'y avait pas de tachyons, ce qui éliminait un obstacle majeur à ce que les cordes soient prises au sérieux. De plus, il n'y avait plus que neuf dimensions, au lieu de vingt-cinq. C'est toujours plus que trois, mais c'est déjà plus près. Lorsqu'on ajoute le temps, la nouvelle corde supersymétrique (ou *supercorde*) vit donc dans un monde à dix dimensions. Dix est égal à onze moins un, et onze, même si cela paraît étrange, est le nombre maximal de dimensions pour lequel une théorie de la supergravité est possible.

Au même moment, un deuxième moyen d'inclure les fermions dans les cordes a été inventé par André Neveu et John Schwarz. Comme la version de Ramond, leur théorie était sans tachyons et était élaborée dans un monde à neuf dimensions spatiales. Neveu et Schwarz ont également trouvé qu'ils pouvaient faire en sorte que les cordes interagissent entre elles, et ils ont obtenu des formules compatibles avec les principes de la mécanique quantique et de la relativité restreinte.

Par conséquent, il ne restait qu'une seule énigme. Comment était-il possible que la nouvelle théorie supersymétrique soit une théorie des interactions fortes, si elle contenait des particules sans masse ? Cependant, il existe bien des bosons sans masse. L'un est le photon. Le photon n'est jamais au repos ; il ne peut que se déplacer à la vitesse de la lumière. Ainsi, il a une énergie mais pas de masse. La même chose est vraie pour le graviton – une particule hypothétique, associée aux ondes gravitationnelles. En 1972, Neveu et un autre physicien français, Joël Scherk, ont trouvé que la supercorde possédait des états vibrationnels qui correspondaient aux bosons de jauge, y compris le photon. C'était encore un pas dans la bonne direction[4].

Mais un autre pas, encore plus important, a été franchi deux ans plus tard, par Scherk et Schwarz. Ils ont trouvé que certaines des particules sans masse prédites par la théorie pouvaient en réalité être des gravitons[5]. (La même idée est venue, au même moment et de façon indépendante, à l'esprit d'un jeune physicien japonais, Tamiaki Yoneya[6].)

Le fait que la théorie des cordes contienne des bosons de jauge et des gravitons a tout bouleversé. Scherk et Schwarz proposèrent immédiatement que la théorie des cordes, au lieu d'être une théorie des interactions fortes, soit une nouvelle théorie fondamentale – la théorie qui unifierait la gravitation et les autres forces. Pour comprendre dans quelle mesure c'est une idée belle et simple, il faut expliquer comment ces particules, qui ressemblent aux photons et aux gravitons, émergent à partir de la corde.

Les cordes peuvent être fermées et ouvertes. Une corde fermée est une boucle. Une corde ouverte est une ligne ; elle possède des extrémités. Les particules sans masse, qui pourraient être des photons, proviennent des vibrations des cordes soit fermées, soit ouvertes. Les gravitons ne proviennent que des vibrations des cordes fermées, ou des boucles.

On peut considérer chaque extrémité d'une corde ouverte comme une particule chargée. Par exemple, un bout pourrait être une particule à charge négative, comme l'électron ; l'autre bout serait alors son antiparticule, le positron, avec une charge positive. Les vibrations sans masse de la corde entre ces deux extrémités décrivent le photon, qui porte la force électrique entre la particule et son antiparticule. Ainsi, si l'on obtient à la fois les forces et les particules à partir des cordes ouvertes et si l'on construit la théorie avec assez d'intelligence, celle-ci pourrait reproduire toutes les forces et toutes les particules du modèle standard.

S'il n'y a que des cordes ouvertes, il n'existe pas de graviton ; par conséquent, il semble que la gravité serait exclue. Mais il s'avère qu'on est *obligé* d'inclure les cordes fermées. La raison en est que la nature produit des collisions entre les particules et les antiparticules. En particulier, celles-ci s'annihilent en créant un photon. Du point de vue des cordes, ce

processus est décrit par le simple fait que deux extrémités de la corde se rencontrent et se rejoignent. Les extrémités disparaissent, et il ne reste qu'une boucle fermée.

En fait, l'annihilation des particules et des antiparticules et la fermeture des cordes sont nécessaires si l'on veut que la théorie soit compatible avec la relativité ; cela signifie que la théorie possède *a fortiori* des cordes ouvertes et fermées. Mais cela signifie également que la théorie inclut la gravité. Et la différence entre la gravité et les autres forces trouve une explication naturelle en termes de différence entre les cordes ouvertes et fermées. Pour la première fois, la gravitation joue un rôle central dans l'unification des forces.

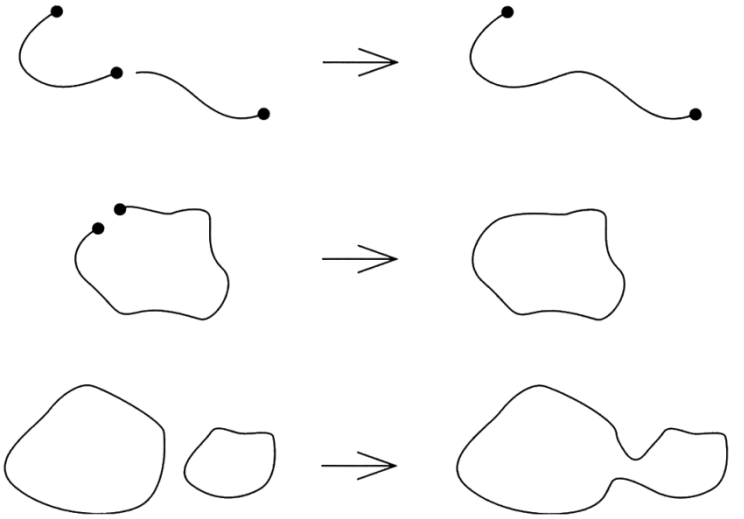
N'est-ce pas magnifique ? La prise en compte de la gravité est si irrésistible qu'un être intelligent et raisonnable pourrait facilement commencer à croire en cette théorie uniquement pour cette raison, qu'il existe ou n'existe pas de preuve expérimentale en sa faveur. C'est particulièrement vrai si la personne en question a cherché pendant des années un moyen d'unifier les forces, et que toutes ses tentatives ont jusque-là échoué.

Mais qu'y a-t-il à la base de ce phénomène ? Y a-t-il une loi qui exige que les extrémités des cordes se rencontrent et se rejoignent ? Ici intervient l'une des plus belles caractéristiques de la théorie, une sorte d'unification du mouvement et des forces.

Dans la majorité des théories, le mouvement des particules et les forces fondamentales sont deux choses séparées. La loi du mouvement dicte la façon dont une particule se déplace en l'absence de forces externes. Logiquement, il n'y a pas de lien entre cette loi et les lois qui régissent les forces.

En théorie des cordes, la situation est très différente. La loi du mouvement dicte sa volonté aux lois des forces, car les forces dans la théorie des cordes ont la même origine que les particules : elles proviennent de la cassure et de l'union des cordes. Une fois le mouvement libre des cordes décrit, tout ce qui reste à faire pour y ajouter les forces, c'est d'ajouter la possibilité pour une corde de se casser en deux. En inversant ce processus dans le temps, on peut ensuite faire se rejoindre deux cordes en une seule (voir figures 5). La loi qui régit la cassure et l'union des cordes subit des contraintes fortes afin d'être compatible avec la relativité restreinte et la théorie quantique. Les forces et le mouvement sont unifiés d'une manière qui serait totalement inimaginable dans une théorie des particules ponctuelles.

Cette unification des forces et du mouvement entraîne une conséquence simple. En théorie des particules, on peut librement ajouter toute sorte de forces, et ainsi rien n'empêche la prolifération des constantes décrivant le fonctionnement de chacune de ces forces. Pourtant, en théorie des cordes, il ne peut y avoir que deux constantes fondamentales. La première, qu'on appelle « tension de la corde », décrit la quantité d'énergie contenue dans l'unité de longueur de la corde. L'autre, que l'on appelle « constante de couplage de la corde », est un nombre qui indique la probabilité que la corde se casse en deux, produisant ainsi une force ; puisqu'il s'agit d'une probabilité, c'est un nombre ordinaire, sans dimension. Toutes les autres constantes de la physique doivent être reliées seulement à ces deux nombres. Il a été démontré par exemple que la constante gravitationnelle de Newton est liée au produit de leurs valeurs.



Figures 5. En haut : deux cordes ouvertes joignent une de leur extrémité. Au milieu : les deux extrémités d'une corde ouverte se joignent pour former une corde fermée. En bas : deux cordes fermées se joignent pour former une seule corde fermée.

En fait, la constante de couplage de la corde n'est pas une constante libre, mais un degré de liberté physique. Sa valeur dépend d'une solution concrète de la théorie, et au lieu d'être un paramètre dans les lois, elle est un paramètre qui s'attache aux solutions. On peut dire que la probabilité pour qu'une corde se casse ou se rejoigne est donnée, non pas par la théorie, mais par l'environnement de la corde – c'est-à-dire, par le monde multidimensionnel particulier où elle vit. (Cette habitude des constantes de migrer des propriétés de la théorie vers les propriétés de l'environnement est un trait important de la théorie des cordes, que nous rencontrerons à nouveau dans le chapitre suivant.) En plus de tout cela, se trouve la loi à laquelle obéissent les cordes, elle aussi belle et simple. Imaginez que vous fassiez des bulles. La bulle prend une forme sphérique parfaite lorsqu'elle se dilate. Ou encore, lorsque vous mettrez du savon moussant dans votre bain, observez les bulles. Leurs formes sont la manifestation d'une loi simple que nous appelons ici « loi des bulles ». Cette loi dit que la surface d'une bulle prend une forme qui correspond à l'aire minimale qu'elle puisse avoir, étant donné les contraintes et les forces qui agissent sur elle.

Ce principe s'applique aussi aux cordes. Lorsqu'une corde unidimensionnelle se déplace à travers le temps, elle forme dans l'espace-temps une surface bidimensionnelle (voir figure 6). Cette surface a une certaine aire, qui est définie, en gros, comme le produit de sa longueur et de sa durée dans le temps.

La corde se déplace de telle sorte qu'elle minimise cette aire. C'est là toute la loi. Celle-ci explique le mouvement des cordes et, une fois qu'on leur a permis de se casser et de se rejoindre, elle explique aussi l'existence de toutes les forces. Elle unifie donc toutes les forces que nous connaissons avec la description des particules. Et cette loi est aussi beaucoup plus simple que les lois décrivant séparément n'importe laquelle des choses qu'elle unifie.

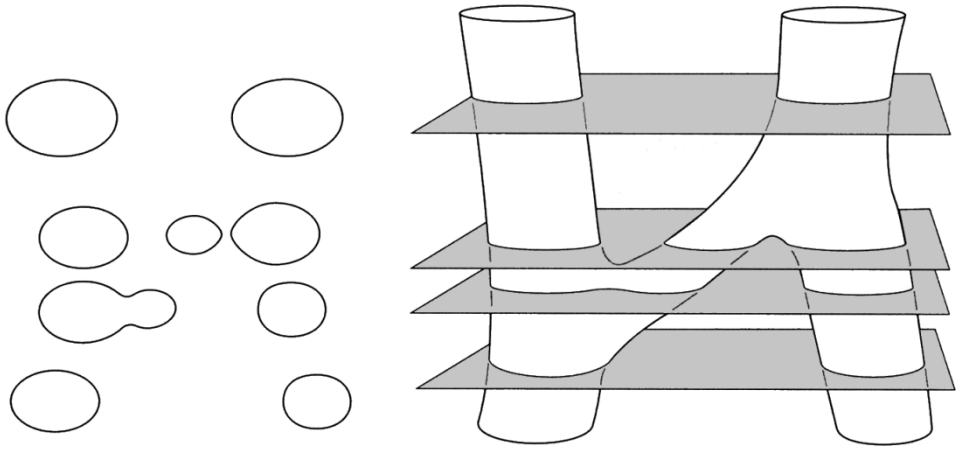


Figure 6. La propagation et l'interaction des cordes sont déterminées par la même loi, qui stipule que l'aire de la surface spatio-temporelle dessinée par les cordes doit être minimale.

Sur la droite, nous voyons la surface spatio-temporelle que dessinent deux cordes fermées interagissant par l'échange d'une troisième corde fermée. Sur la gauche, une représentation uniquement spatiale de la même séquence, que l'on obtient en découpant des tranches horizontales dans l'image de droite. Nous voyons d'abord deux cordes fermées, puis l'une se sépare en deux, donnant une troisième corde qui se déplace et rejoint l'autre.

La théorie des cordes célèbre encore une autre réussite de l'unification. Au début du XIX^e^ siècle, Michael Faraday imagina le champ électrique et le champ magnétique en termes de « lignes de champ » – des lignes qui vont du pôle d'un aimant à un autre, ou entre des charges électriques positive et négative. Pour Faraday, ces lignes étaient bien réelles ; elles étaient ce qui porte la force entre les aimants ou les charges.

Dans la théorie de Maxwell, les lignes de champ sont devenues secondaires par rapport aux champs, mais cela n'est par ailleurs pas nécessaire. On peut considérer que ce sont les lignes de champ qui existent réellement, que les forces sont des lignes de champ qui s'étendent entre les particules. C'est impossible en théorie classique, pas en théorie quantique.

Dans un supraconducteur – un matériau avec peu ou aucune résistance électrique –, les lignes de champ, celles du champ magnétique, deviennent discrètes. Chacune d'elles porte une quantité minimale de flux magnétique. On peut imaginer ces lignes de champ comme des espèces d'atome du champ magnétique. Au début des années 1970, trois visionnaires ont suggéré qu'il en allait de même pour les lignes de force en CDQ, qui sont analogues aux lignes de champ électrique dans la théorie électromagnétique. C'est ainsi que le physicien danois Holger Nielsen devint l'un des inventeurs de la théorie des cordes : il a traité les cordes comme des lignes quantifiées du flux électrique. Cette image fut ensuite développée par Kenneth Wilson à Cornell et, depuis, les lignes du champ électrique quantifié s'appellent « lignes de Wilson ». Le troisième visionnaire était le physicien russe Alexandre Polyakov qui, de toute évidence, est celui qui a le plus réfléchi sur la relation entre les théories de jauge et les théories des cordes. Polyakov a donné le séminaire qui m'a le plus

inspiré, alors que j'étais étudiant en troisième cycle ; il y a proclamé son ambition de trouver les solutions exactes de la CDQ en l'exprimant sous forme d'une théorie des cordes – ces cordes étant les lignes du flux électrique quantifié.

Selon ces trois visionnaires, les objets premiers en théorie de jauge sont des lignes de champ. Celles-ci satisfont à des lois simples, qui dictent comment ces lignes s'étirent entre les charges. Les champs eux-mêmes se présentent seulement comme une description alternative. Cette façon de penser rentre naturellement dans le cadre de la théorie des cordes, parce qu'on peut considérer les lignes de champ comme des cordes.

Cela suggère une double description : on peut envisager les lignes de champ en tant qu'objets primaires et les lois fondamentales comme des descriptions de la manière dont celles-là s'étirent et se déplacent ; ou bien on peut envisager les champs comme primaires et les lignes de champ comme n'étant rien d'autre qu'une façon pratique de décrire le champ. En théorie quantique, les deux descriptions marchent. Cela donne naissance au principe appelé « dualité des cordes et des champs ». En résumé, les deux descriptions sont valables et chacune peut être considérée comme fondamentale.

Pierre Ramond s'est vu refuser un poste permanent à Yale, en 1976, quelques années après avoir résolu quelques-uns des problèmes fondamentaux de la théorie des cordes. Il s'avère qu'inventer une façon d'inclure les fermions dans la théorie des cordes, de découvrir la supersymétrie et de supprimer le tachyon – tout cela d'un seul coup ! – n'a pas suffi à convaincre ses collègues qu'il méritait un poste de professeur dans une université de la *Ivy League*.

Au même moment, John Schwarz s'est vu refuser un poste permanent à Princeton, en 1972, malgré ses contributions fondamentales à la théorie des cordes. Il est parti au Caltech, où il est resté assistant de recherche pendant les douze années qui suivirent, survivant grâce à des fonds provisoires dont il demandait périodiquement le renouvellement. Il n'était pas obligé d'enseigner, mais il n'a pas non plus été titularisé. Il a fait la toute première découverte, celle qui a enfin marché, sur l'unification possible de la gravité et des autres forces, mais le Caltech est apparemment resté sceptique quant à la légitimité de son appartenance éventuelle au corps de ses professeurs titulaires.

Les premiers inventeurs de la théorie des cordes ont sans aucun doute payé très cher leurs découvertes pionnières. Pour comprendre de quelle sorte de gens il s'agissait, le lecteur doit réaliser ce que cela signifie concrètement. Les amis que vous fréquentiez en thèse sont devenus professeurs de première classe avec des postes de titulaires. Ils ont de bons salaires, la sécurité de l'emploi, et ils peuvent facilement subvenir aux besoins de leurs familles. Ils ont de hautes positions dans des universités d'élite. Et vous, vous n'avez rien. Au fond de vous-mêmes, vous savez qu'ils ont pris un chemin facile, alors que vous avez réalisé quelque chose qui, potentiellement, est beaucoup plus important et qui a demandé beaucoup plus de courage et de créativité. Ils ont suivi le troupeau ; vous avez découvert une nouvelle théorie. Mais vous êtes encore un post-doc, ou un associé de recherche, ou un maître de conférence. Vous n'avez pas de travail à long terme, pas de sécurité et des perspectives incertaines. Et malgré tout cela vous avez encore la chance d'être plus actif –

publier plus d'articles ou diriger les travaux de plus d'étudiants – que les autres chercheurs dont le travail moins risqué a été récompensé par plus de sécurité et de certitude.

Maintenant, cher lecteur, qu'auriez-vous fait dans cette situation ?

John Schwarz a poursuivi ses recherches sur la théorie des cordes et il a découvert encore plus de preuves qu'elle pouvait être la théorie unificatrice de toute la physique. Bien qu'il n'ait pu démontrer la consistance mathématique de la théorie, il était certain d'être sur la bonne voie[*]. Malgré les obstacles que les premiers théoriciens des cordes rencontraient, ils s'encourageaient en pensant à toutes les énigmes qui seraient résolues si les particules élémentaires étaient des cordes. La liste est assez impressionnante :

1. La théorie des cordes nous a fourni une unification automatique et « gratuite » de toutes les particules élémentaires ; elle a aussi unifié les forces les unes avec les autres. Celles-ci proviennent toutes des vibrations d'un seul objet fondamental, qui est la corde.
2. La théorie des cordes nous a fourni automatiquement les champs de jauge, qui sont responsables de l'électromagnétisme et des forces nucléaires. Celles-ci émergent naturellement des vibrations des cordes ouvertes.
3. La théorie des cordes nous a fourni automatiquement les gravitons, qui proviennent des vibrations des cordes fermées et toute théorie quantique des cordes doit inclure les cordes fermées. En conséquence, nous avons obtenu gratuitement une unification automatique de la gravité avec les autres forces.
4. La théorie des cordes supersymétriques a unifié les bosons et les fermions, qui ne sont, tous les deux, que des oscillations des cordes, unifiant ainsi toutes les forces avec toutes les particules.

De plus, même si la supersymétrie peut être vraie sans que la théorie des cordes le soit, celle-ci fait place à la supersymétrie d'une façon beaucoup plus naturelle que les théories ordinaires des particules. Tandis que les versions supersymétriques du modèle standard sont laides et compliquées, les théories des cordes supersymétriques sont des objets d'une grande élégance.

Pour compléter le tout, la théorie des cordes a réalisé sans aucun effort l'unification naturelle des lois du mouvement et des lois qui régissent les forces.

Voici donc le rêve que la théorie des cordes rend possible. Tout le modèle standard avec ses douze types de quarks et de leptons et ses trois forces, plus la gravitation, pourrait être unifié, tous ces phénomènes émergeant des vibrations de cordes qui s'étirent dans l'espace-temps suivant la loi la plus simple possible : que leur aire soit minimale. Toutes les constantes du modèle standard pourraient être réduites à des combinaisons de la constante gravitationnelle de Newton plus un nombre simple, la probabilité pour qu'une corde se casse en deux et se rejoigne. Ce nombre n'est même pas fondamental, c'est une propriété de l'environnement.

[*] La théorie est mathématiquement consistante si elle ne produit jamais deux résultats qui se contredisent. Une autre condition, liée à celle-ci, est que toutes les quantités physiques que la théorie décrit ne fassent intervenir que des nombres finis.

La théorie des cordes était si prometteuse qu'il n'est guère étonnant que Schwarz et ses collaborateurs, peu nombreux à l'époque, fussent convaincus de sa véracité. En ce qui concerne l'unification, aucune autre théorie n'a offert autant à partir d'une seule idée si simple. Devant une telle promesse, deux questions restaient : cela marche-t-il ? quel en est le prix ?

En 1983, alors que j'étais encore en post-doc à l'Institut d'études avancées à Princeton, John Schwarz a été invité à l'Université de Princeton pour faire deux conférences sur la théorie des cordes. Jusqu'alors, je n'avais jamais entendu parler de cette théorie. Ce dont je me rappelle de son séminaire est la réaction à la fois vive et tendue du public, due tout à la fois à l'intérêt et au scepticisme qu'il soulevait. Edward Witten, une figure déjà dominante en physique des particules élémentaires, a souvent interrompu Schwarz pour lui poser sans relâche des questions difficiles. Je l'ai pris comme un signe de scepticisme ; j'ai compris plus tard que c'était un signe de grand intérêt. Schwarz était confiant, mais obstiné. J'avais l'impression qu'il avait passé beaucoup de temps à essayer de communiquer aux autres son excitation au sujet de la théorie des cordes. Son exposé m'a convaincu que Schwarz était un scientifique courageux, mais il ne m'a pas persuadé de travailler moi-même sur la théorie des cordes. À ce moment, chacun autour de moi ignorait la nouvelle théorie et poursuivait ses recherches sur son propre projet. Peu d'entre nous ont compris que nous vivions les derniers jours de la physique telle qu'on l'avait connue.

8
La première révolution des supercordes

La première révolution des supercordes a eu lieu en automne 1984. Parler de révolution paraît un peu prétentieux, mais le mot est approprié. Six mois plus tôt, une poignée d'intrépides physiciens travaillaient sur la théorie des cordes. Tous les autres, sauf peut-être quelques collègues, les ignoraient. Comme le raconte John Schwarz, lui et son nouveau collaborateur, un physicien anglais nommé Michael Green, ont « publié pas mal d'articles, et chaque fois j'étais assez fasciné par les résultats... [D]ans chaque cas, nous avons cru que les gens allaient maintenant s'intéresser enfin au sujet, parce qu'ils pouvaient percevoir combien celui-ci était vraiment fascinant. Mais il n'y avait toujours pas de réaction[7] ». Six mois plus tard, parmi les physiciens les plus critiques de la théorie des cordes, plusieurs étaient eux-mêmes décidés à y travailler. Dans ce nouvel environnement, il fallait être courageux pour *ne pas* renoncer à ce sur quoi l'on était en train de travailler pour rejoindre les théoriciens des cordes.

Ce qui renversa la donne était un calcul réalisé par Schwarz et Green, qui a fourni une preuve saisissante du caractère finitaire et cohérent de la théorie des cordes. Plus concrètement, ils ont réussi à démontrer qu'une pathologie dangereuse, dont souffrent beaucoup de théories unifiées et qu'on appelle « anomalie », était absente dans le cas de la théorie des cordes supersymétriques, au moins en dix dimensions spatio-temporelles[8]. Je me rappelle que la réaction à leur article a été à la fois un choc et une jubilation : un choc, parce que certains chercheurs doutaient que la théorie des cordes puisse jamais être compatible avec la mécanique quantique, à tous les niveaux ; jubilation, parce qu'en montrant que les autres avaient tort, Green et Schwarz avaient rendu possible la théorie ultime, qui unifierait toute la physique.

Jamais aucun changement n'avait été si rapide. Schwarz s'en souvient :

> [Avant] que nous ayons même fini d'écrire l'article, nous avons reçu un appel téléphonique d'Ed Witten. Il avait entendu dire [...] que nous avions un résultat sur l'annulation des anomalies. Et il a demandé s'il pouvait voir nos travaux. Nous lui avons donc envoyé par FedEx un brouillon du manuscrit que nous avions déjà à l'époque. Le courrier électronique n'existait pas ; mais FedEx existait. Nous lui avons donc envoyé le texte, et il l'a reçu le lendemain. Un jour après, tout le monde à Princeton et à l'Institut d'études avancées, tous les théoriciens physiciens, et il y en avait beaucoup, étaient en train de travail-

> ler dessus... Alors, en l'espace d'une nuit, c'est devenu une industrie majeure [*rire*], au moins à Princeton – et très vite dans le reste du monde. Tout cela nous a paru assez bizarre, parce que depuis de longues années, nous publiions nos résultats et, chaque fois, personne n'y faisait attention. Ensuite, tout d'un coup tout le monde s'est déclaré très intéressé. Cela est passé d'un extrême à un autre : d'abord, personne ne le prenait au sérieux, et puis l'autre extrême[9]...

La théorie des cordes a promis ce qu'aucune autre théorie n'avait jamais promis – une théorie quantique de la gravitation, qui serait aussi une unification authentique des forces et de la matière. Elle a promis, d'un coup de maître audacieux et élégant, la solution pour au moins trois des cinq grands problèmes de la physique théorique. Ainsi, après tant d'échecs, on avait découvert de l'or. (Il est amusant de mentionner que Schwarz a reçu sans attendre un poste de professeur de première classe à Caltech, au lieu de son ancien poste de professeur associé.)

Thomas Kuhn, dans son fameux ouvrage *La Structure des révolutions scientifiques*, a proposé une nouvelle façon de penser les événements de l'histoire scientifique que nous considérons comme révolutionnaires. Selon Kuhn, une révolution scientifique est précédée par un amoncellement d'anomalies expérimentales. Les chercheurs commencent donc à se poser des questions au sujet de la théorie que l'on croit établie. Certains en inventent de nouvelles. La révolution se termine par des résultats expérimentaux, qui favorisent une des alternatives à la théorie antérieure[10]. Il est toutefois possible de ne pas être entièrement d'accord avec la science telle que la décrit Kuhn, et je serais moi-même partiellement en désaccord avec lui dans le dernier chapitre de ce livre. Mais puisque Kuhn a décrit ce qui s'est produit réellement dans certains cas, son point de vue peut servir utilement de point de comparaison.

Les événements de 1984 n'ont pas suivi la structure de Kuhn. Il n'y a jamais eu de théorie établie qui abordait les mêmes problèmes que ceux considérés par la théorie des cordes. Il n'y avait pas d'anomalie expérimentale ; le modèle standard de la physique des particules et la relativité générale ont suffi pour expliquer les résultats de toutes les expériences menées à ce jour. Mais malgré tout, comment peut-on ne pas appeler cet événement une révolution ? Tout d'un coup, nous avions un bon candidat pour la théorie ultime, qui pourrait expliquer l'univers et la place que nous y occupons.

Pendant les quatre ou cinq ans qui ont suivi la révolution des supercordes de 1984, il y a eu beaucoup de progrès ; l'intérêt porté à la théorie des cordes n'a cessé de croître. C'était la dernière mode. Ceux qui se sont lancés dans cette aventure s'y sont plongés avec ambition et fierté. Il y avait beaucoup de nouveaux outils techniques dont il fallait apprendre la maîtrise ; travailler en théorie des cordes demandait donc quelques mois, ou même un an d'investissement, ce qui est long à l'échelle de la physique théorique. Ceux qui ont entrepris cette démarche regardaient de haut ceux qui ne voulaient ou ne pouvaient pas les rejoindre. Très vite une atmosphère d'idolâtrie s'est développée. Soit vous étiez théoricien des cordes, soit vous ne l'étiez pas. Peu d'entre nous gardèrent leur sang-froid, disant : « L'approche est intéressante, je vais y travailler pendant un moment, mais je vais aussi poursuivre dans les autres directions. » Une telle position n'était pas facile à

tenir, parce que ceux qui travaillaient désormais dans ce domaine de recherche ne désiraient pas spécialement poursuivre les discussions avec ceux qui ne s'étaient pas encore déterminés.

Comme il sied à une discipline neuve, des colloques et des conférences furent immédiatement organisés. Cela ressemblait à un couronnement. Il était sous-entendu que la seule vraie théorie physique venait d'être découverte. Les autres domaines n'avaient plus aucune importance et ne méritaient pas la moindre réflexion. Les séminaires consacrés à la théorie des cordes ont vite envahi toutes les grandes universités et les institutions de recherche. À Harvard, le séminaire de la théorie des cordes s'intitulait « séminaire de physique postmoderne ». Cette appellation n'était absolument pas ironique. Un des problèmes, dont on discutait rarement aux séminaires et colloques consacrés à la théorie des cordes, était de savoir comment elle pouvait être testée expérimentalement. Tandis que quelques-uns s'en inquiétaient, la majorité n'en voyait pas la nécessité. Le sentiment général était qu'il ne pouvait y avoir qu'une seule théorie cohérente pour unifier toute la physique, et puisqu'il semblait que la théorie des cordes parvenait à cette unification, *elle devait être vraie*. Plus besoin d'expériences pour vérifier les théories. L'expérimentation, c'est bon pour Galilée. Désormais, les mathématiques suffisent pour explorer les lois de la nature. Nous étions entrés de plain-pied dans la période postmoderne de la physique !

Très rapidement, les physiciens ont compris que la théorie des cordes n'était, finalement, pas unique. Au lieu d'une seule théorie cohérente, on a bientôt découvert qu'il existait cinq théories des supercordes, toutes cohérentes, dans l'espace-temps à dix dimensions. Cette nouvelle énigme n'a été résolue qu'environ dix ans plus tard. Toutefois, les nouvelles n'étaient pas trop mauvaises. Rappelez-vous que la théorie de Kaluza-Klein avait un défaut qui lui fut fatal : les univers qu'elle décrivait étaient trop symétriques, ce qui ne concordait pas avec le simple fait que la nature n'est pas la même lorsqu'on la contemple dans un miroir. Certaines parmi les cinq théories des supercordes ont échappé à ce destin en décrivant des mondes aussi asymétriques que le nôtre. Et puis, des développements nouveaux ont confirmé que la théorie des cordes était finitaire (c'est-à-dire qu'elle ne donnerait que des nombres finis comme prédictions des résultats expérimentaux). Dans le cas de la corde bosonique, sans fermions, il est effectivement facile de montrer que les expressions infinies, analogues à celles de la théorie des gravitons, n'apparaissent pas ; mais quand on calcule les probabilités à un ordre plus élevé de précision, les infinis peuvent surgir à cause de l'instabilité du tachyon. Puisque la supercorde n'a pas de tachyon, cela permet à la théorie de ne pas contenir d'infinis du tout.

Ce phénomène a été facile à vérifier à un degré bas d'approximation. Au-delà de ce point, il existait des arguments intuitifs selon lesquels la théorie était finitaire à chaque ordre de l'approximation. Je me rappelle d'un éminent théoricien des cordes qui affirmait qu'il était si évident que la théorie des cordes était finitaire qu'il ne se donnerait même pas la peine d'en étudier la preuve quand bien même il y en aurait une. Pourtant certains physiciens se sont efforcés de vérifier sa finitude au-delà de la première approximation. Finalement, en 1992, Stanley Mandelstam, physicien et mathématicien hautement respecté de

l'université de Berkeley, a publié un article dont on pense qu'il prouve que les théories des supercordes sont finies à tous les ordres d'un certain schéma d'approximation[11].

Il n'était guère étonnant de rencontrer des gens tellement enthousiastes. Les promesses de la théorie des cordes dépassaient de loin celle de toutes les théories unifiées, proposées jusque-là. En même temps, il était évident qu'il restait encore un long chemin pour que cette promesse s'accomplisse. Par exemple, considérez le problème d'explication des constantes du modèle standard. La théorie des cordes, comme je l'ai déjà dit dans le chapitre précédent, n'a qu'une seule constante qu'on est libre d'ajuster à la main. *Si la théorie des cordes est vraie, alors on doit expliquer vingt constantes du modèle standard en termes de cette constante unique*. Il aurait été merveilleux au-delà de l'imaginable que toutes ces constantes aient pu être calculées comme fonctions d'un seul paramètre de la théorie – cela aurait été un triomphe sans précédent dans l'histoire des sciences. Mais nous n'y étions pas encore.

Restait la question qu'il faut toujours poser aux théories de l'unification, évoquée plus haut : comment explique-t-on les différences apparentes entre les forces et les particules unifiées ? La théorie des cordes les unifie toutes, ce qui signifie en même temps qu'elle doit expliquer pourquoi elles sont différentes.

Et comme toujours, nous en sommes venus aux détails. Tout ceci marche-t-il vraiment ? ou bien y a-t-il des clauses qui amoindrissent le miracle ? Si cela marche, comment est-il possible qu'une théorie si simple explique tant de choses ? Que doit-on penser de la nature si la théorie des cordes est vraie ? Que perd-on en chemin, si toutefois l'on perd quelque chose ?

Comme, petit à petit, j'apprenais plus de choses sur la théorie, j'ai commencé à réfléchir sur les défis qu'elle posait, et qui ressemblaient de près à ceux qu'on rencontre quand on achète une nouvelle voiture. Vous allez voir le garagiste avec la liste des options que vous désirez. Le garagiste est très heureux de vous vendre la voiture que vous souhaitez. Il vous montre quelques modèles correspondant à vos critères. Après un moment de réflexion, vous comprenez que chacune de ces voitures a une ou plusieurs options qui ne sont pas sur votre liste. Vous vouliez l'ABS et un système audio très performant pour écouter vos CD. Or les voitures qui les possèdent ont aussi des toits ouvrants, des pare-chocs chromés très tendance, des enjoliveurs en titane, huit porte-gobelets et des décorations de course automobile, faites sur mesure.

C'est ce qu'on appelle un « *package deal* ». Il s'avère que vous ne pouvez pas acheter une voiture avec seulement les options que vous désirez. Il vous faut accepter l'ensemble des options, qui inclut des éléments que vous ne voulez pas ou dont vous n'avez pas besoin. Ces extra font considérablement augmenter le prix, mais il n'y a pas d'autre choix. Si vous voulez l'ABS et un système audio pour vos CD, vous êtes obligé d'acheter tout le reste du paquet.

La théorie des cordes, elle aussi, se présente sous la forme d'une offre groupée. Vous désirez une simple théorie unifiée de toutes les particules et de toutes les forces, mais ce que vous obtenez inclut aussi quelques options supplémentaires, dont deux au moins ne sont pas négociables.

La première est la supersymétrie. Il existait des théories des cordes sans supersymétrie, mais on savait que toutes n'étaient pas stables en raison de ces ennuyeux tachyons. En toute vraisemblance, la supersymétrie a éliminé les tachyons, mais il y avait un prix à payer. La théorie des cordes supersymétriques ne peut être cohérente que si l'univers a neuf dimensions spatiales. Il n'y a pas d'option pour une théorie en trois dimensions. Si vous désirez les autres particularités que vous avez commandées, alors prenez encore six dimensions supplémentaires. Cela a eu plusieurs conséquences. Si la théorie n'a pas été abandonnée immédiatement, c'est qu'il y avait une manière de cacher les dimensions qui venaient en plus. La seule possibilité était de les enrouler, de telle sorte qu'elles soient trop petites pour qu'on puisse les voir. On a donc été obligé de remettre au goût du jour les bonnes vieilles conceptions des théories unifiées d'autrefois.

Cela ouvrit de nouvelles perspectives et mena à de grands problèmes. Comme on l'a vu, les premières tentatives d'utiliser des dimensions supplémentaires pour unifier la physique ont échoué par abondance de solutions ; l'introduction de dimensions supérieures entraîne un gros problème de non-unicité. Elle produit également de l'instabilité, car des processus peuvent forcer les dimensions supplémentaires à se révéler à nous en devenant de plus en plus grandes, ou au contraire à s'effondrer en des singularités. Si la théorie des cordes voulait réussir, elle aurait dû résoudre ces problèmes.

Les théoriciens des cordes ont vite compris que le problème de non-unicité était une caractéristique fondamentale de la théorie des cordes. Il y avait maintenant six dimensions à enrouler, et plusieurs façons de le faire. Chaque possibilité impliquait un espace compliqué à six dimensions, et chacune produisait finalement une version différente de la théorie des cordes. Puisque celle-ci dépend du fond, nous avons compris, sur le plan technique, qu'elle donnait une description des cordes qui se déplacent sur un fond géométrique fixe. En choisissant des géométries variées, techniquement, on obtenait des théories différentes. Elles provenaient de la même conception, et dans chaque cas la même loi s'appliquait. Mais, strictement parlant, chacune était une théorie différente des autres.

Cela ne revient pas seulement à couper les cheveux en quatre. En effet, les prédictions physiques données par l'ensemble de ces différentes théories étaient, elles aussi, différentes. La plupart des espaces à six dimensions étaient décrits à l'aide d'une liste de constantes que l'on pouvait fixer librement. Celles-ci correspondaient à des caractéristiques différentes de la géométrie, comme par exemple les volumes des dimensions supplémentaires. Une théorie des cordes type aurait des centaines de ces constantes ; ces constantes constituent une partie de la description de la façon dont les cordes se propagent et interagissent les unes avec les autres.

Pensez à un objet dont la surface a deux dimensions, comme une sphère. Puisqu'elle est parfaitement sphérique, la surface de la sphère est décrite par seulement un paramètre : sa circonférence. Mais maintenant imaginez une surface plus compliquée, comme celle d'un beignet (voir figure 7). Cette surface peut être décrite par deux nombres. Ceux-ci représentent deux cercles, qui entourent le beignet de deux façons différentes ; ils peuvent aussi avoir des circonférences différentes.

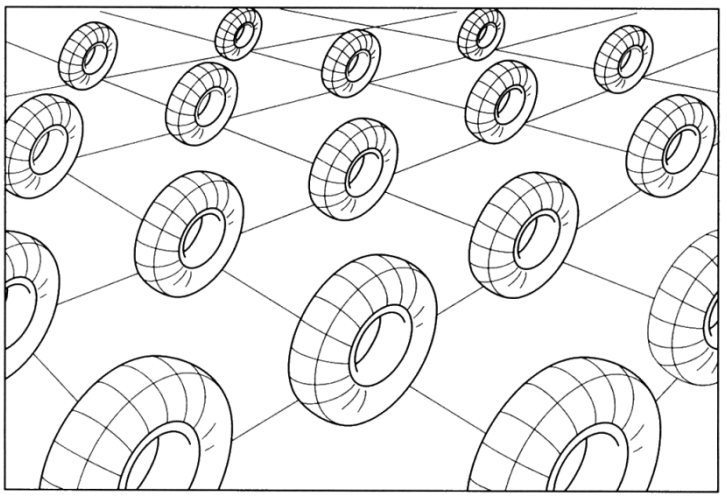


Figure 7. Les dimensions cachées admettent différentes topologies. Ici, deux dimensions cachées adoptent la forme d'un beignet, ou *tore*.

On peut imaginer des surfaces plus compliquées, pleines de trous. Pour les décrire, il faudrait encore plus de nombres. Mais personne – autant que je sache – ne peut directement visualiser un espace à six dimensions.

Pourtant, on a bien des instruments pour les décrire, qui utilisent l'équivalent des trous dans les beignets ou dans toute autre surface bidimensionnelle. Au lieu d'enrouler une corde autour d'un trou, on enroule autour de lui un espace de dimension supérieure. Dans chaque situation, l'espace qui est enroulé possède un volume, et ce volume devient une constante qui décrit la géométrie. Quand on découvre comment les cordes se déplacent en dimensions supérieures, toutes ces constantes réapparaissent. Par conséquent, il n'y a plus seulement une constante, mais un grand nombre de constantes.

C'est ainsi que la théorie des cordes résout le dilemme fondamental qui se pose à toutes les tentatives d'unifier la physique. Même si tout ne provient que d'un principe simple, il faut expliquer l'origine de la variété des particules et des forces. La possibilité la plus évidente en est que le nombre de dimensions spatiales est égal à neuf ; dans ce cas-là, la théorie des cordes est très simple : toutes les particules du même type sont identiques. Mais quand on permet aux cordes de se déplacer dans une géométrie compliquée à six dimensions supplémentaires, beaucoup de nouveaux types de particules surgissent, associés aux différentes façons de se déplacer et de vibrer dans chacune des dimensions supplémentaires.

On obtient ainsi une explication naturelle de la différence apparente entre les particules – une chose que la théorie unifiée doit de toute façon fournir. Le coût : la théorie n'est plus unique du tout. Ce n'est rien d'autre qu'un commerce de constantes, où les constantes donnant les masses des particules et les puissances des forces sont échangées pour des constantes exprimant la géométrie des six dimensions supplémentaires. Il n'est donc guère surprenant de trouver parmi tout cela des constantes qui correspondent au modèle standard.

Toutefois, même sous cette forme, le schéma serait encore attractif s'il menait à des prédictions uniques pour les constantes du modèle standard. Si, par la traduction des constantes du modèle standard en constantes qui dénotent la géométrie des dimensions supplémentaires, on trouvait quelque chose de nouveau à propos des constantes du modèle standard, et si ces résultats étaient en accord avec l'expérience, alors cela constituerait une preuve presque incontestable que la théorie des cordes doit être vraie.

Cela ne s'est pas produit. Les constantes que l'on faisait varier librement dans le modèle standard ont été traduites en des géométries que l'on fait varier librement en théorie des cordes. Rien n'a été contraint ni réduit. Et puisqu'il existe un grand nombre de possibilités pour la géométrie des dimensions supplémentaires, le nombre de constantes libres a augmenté au lieu de diminuer.

Qui plus est, le modèle standard n'a pas été reproduit en entier. Il est vrai que l'on pouvait dériver ses traits majeurs, comme l'existence des fermions et des champs de jauge. Mais leurs combinaisons exactes que l'on observe dans la nature ne se produisaient pas à partir des équations.

À partir de là, les choses ont empiré. Toutes les théories des cordes ont prédit l'existence de particules supplémentaires qu'on ne voit pas dans la nature. Avec ces particules sont venues encore de nouvelles forces. Certaines parmi ces forces provenaient des variations de la géométrie dans les dimensions supplémentaires.

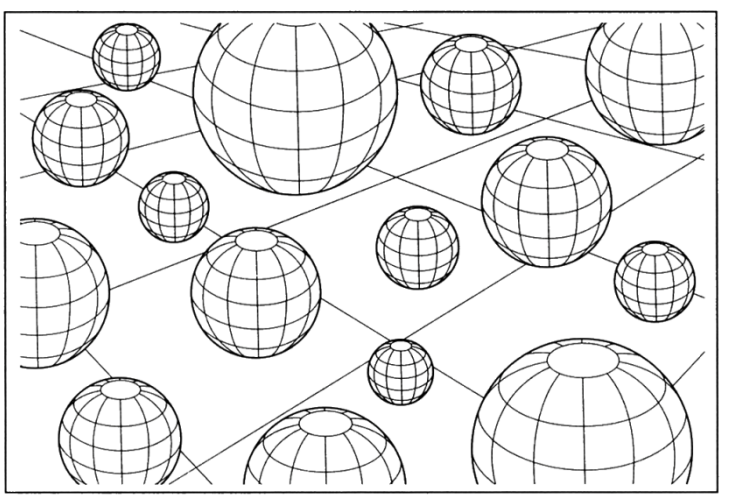


Figure 8. La géométrie des dimensions cachées peut varier dans l'espace et le temps. Ici, le rayon des sphères varie.

Imaginez une sphère attachée à chaque point de l'espace (figure 8). Le diamètre de la sphère peut varier lorsqu'on se promène dans l'espace. Par conséquent, on peut traiter le diamètre de chaque sphère comme propriété du point auquel elle s'attache. C'est-à-dire que cela ressemble à un champ. Exactement comme le champ électromagnétique, ces champs se propagent, eux aussi, dans l'espace et dans le temps ; cela donne naissance aux

nouvelles forces. Le schéma est intelligent, mais ces forces supplémentaires peuvent néanmoins être en désaccord avec l'observation.

On a parlé de généralités, mais il n'y a qu'un monde. Si la théorie des cordes doit réussir, elle doit non seulement créer des modèles de mondes possibles, mais aussi expliquer le nôtre. Par conséquent, la question cruciale qui se pose est la suivante : *existe-t-il un moyen d'enrouler les six dimensions supplémentaires de telle façon que le modèle standard de la physique des particules soit reproduit en entier ?*

Un de ces moyens était d'avoir un monde régit par la supersymétrie. Bien que la théorie des cordes soit une théorie supersymétrique, la manière exacte dont cette symétrie s'est manifestée dans notre monde tridimensionnel dépendait de la géométrie des dimensions supplémentaires. On pourrait faire en sorte que, dans notre monde, la supersymétrie soit brisée. Ou bien il est aussi possible qu'on ait beaucoup plus de supersymétries que ne pouvait en contenir une théorie réaliste.

En conséquence, un problème intéressant a été posé : peut-on choisir la géométrie des six dimensions supplémentaires de telle façon qu'en sorte exactement le bon type de supersymétrie ? Peut-on s'arranger pour que notre monde tridimensionnel ait une version de la physique des particules telle que décrite par les versions supersymétriques du modèle standard ?

Cette question fut résolue en 1985, dans un article essentiel écrit par quatre théoriciens des cordes : Philip Candelas, Gary Horowitz, Andrew Strominger et Edward Witten[12]. Ils eurent de la chance, car deux mathématiciens, Eugenio Calabi et Shing-tung Yau, avaient déjà résolu un problème mathématique qui donnait la réponse. Ils ont découvert et étudié une espèce particulièrement élégante de géométrie à six dimensions, que nous appelons aujourd'hui les « espaces de Calabi-Yau ». Les quatre théoriciens ont montré que les conditions nécessaires pour que la théorie des cordes reproduise une version du modèle standard supersymétrique étaient les mêmes que les conditions qui définissaient les espaces de Calabi-Yau. Ils ont donc proposé que la nature soit décrite par une théorie des cordes où les six dimensions supplémentaires sont de la forme d'un espace de Calabi-Yau. Cela a réduit l'abondance des possibilités et a donné plus de structure à la théorie. Ils ont ainsi montré explicitement comment mettre en relation les constantes du modèle standard, comme celles qui déterminent les masses des différentes particules, avec les constantes qui décrivent la géométrie d'un espace de Calabi-Yau.

C'était un grand pas en avant, mais il restait un autre problème de même ampleur. S'il n'existait qu'un seul espace de Calabi-Yau, avec des constantes fixes, on aurait eu l'unique théorie unifiée tant désirée. Malheureusement, il existait une multitude d'espaces de Calabi-Yau. Personne ne savait combien exactement, mais Yau lui-même proposait « au moins cent mille ». Chacun de ces espaces produisait une version différente de la physique des particules. Chacun venait avec sa liste de constantes régissant sa taille et sa forme. Par conséquent, il n'y a pas eu d'unicité, ni de prédictions nouvelles, et rien n'a été expliqué.

De plus, les théories qui ont fait jouer les espaces de Calabi-Yau introduisaient une multitude de forces supplémentaires. Lorsque la théorie des cordes devenait supersymétrique, beaucoup de ces forces avaient une portée infinie. Une conséquence malheureuse, puis-

qu'il existait des limites expérimentales très concrètes à la possibilité d'une force à portée infinie autre que la gravitation et l'électromagnétisme.

D'autres problèmes demeuraient en suspens. Les constantes qui déterminaient la géométrie des dimensions supérieures pouvaient varier de façon continue. Cela donnait lieu à des instabilités, comme dans les vieilles théories de Kaluza-Klein. Ces instabilités entraînaient des catastrophes telles que des singularités issues de l'effondrement des dimensions supplémentaires, à moins qu'on ajoute un mécanisme d'origine inconnue pour geler la géométrie des dimensions supplémentaires.

Pour couronner le tout, dans l'éventualité où notre monde était réellement décrit par une des géométries de Calabi-Yau, rien n'expliquait comment cela s'était produit. De multiples versions de théories des cordes apparaissaient toujours, en plus de celles à espaces de Calabi-Yau, où le nombre des dimensions bouclées variait entre zéro et neuf. On appelait « plates » les géométries dont les dimensions étaient non courbées ; elles définissaient des mondes que des êtres de notre taille pouvaient expérimenter. (En explorant les implications pour la physique des particules, on pouvait ignorer la gravité et la cosmologie, auquel cas les dimensions non courbées auraient une géométrie décrite par la théorie restreinte de relativité.)

Cent mille variétés de Calabi-Yau n'étaient que le sommet de l'iceberg. En 1986, Andrew Strominger a découvert encore une autre façon de construire un grand nombre de théories des cordes supersymétriques. Il est utile de garder en mémoire ce qu'il a écrit dans la conclusion de l'article où il a présenté cette construction :

> [L]a classe des compactifications supersymétriques des supercordes a été considérablement élargie... [I]l ne semble pas probable que [ces] solutions [...] puissent être classifiées dans un avenir envisageable. Puisque les contraintes sur [ces] solutions sont relativement faibles, il ne semble pas probable non plus qu'un certain nombre d'entre elles, qui seraient phénoménologiquement acceptables [...] ne puisse être trouvé [...] Bien que cela paraisse assez rassurant, dans un certain sens, la vie est devenue trop facile. *Il semble que tout pouvoir prédictif ait été perdu*.
>
> Tout ceci tend vers le besoin immédiat de trouver un principe dynamique pour déterminer [laquelle de ces théories décrit la nature], ce qui paraît maintenant plus impératif que jamais[13]. [C'est moi qui souligne.]

Ainsi, suivant la stratégie des théories à dimensions supérieures, la théorie des cordes a, en même temps, adopté leurs problèmes. Il y avait beaucoup de solutions, et peu d'entre elles produisaient des descriptions ressemblant même de loin à notre monde ; la plupart en étaient très éloignées. Il y avait aussi beaucoup d'instabilités qui se manifestaient sous forme de particules et de forces supplémentaires.

Cela ne pouvait pas ne pas créer de controverse. Les chercheurs s'accordaient à dire que la liste des traits positifs était longue et impressionnante. Il semblait véritablement que l'idée des particules considérées comme des vibrations des cordes soit le lien manquant, qui possédait le potentiel nécessaire pour résoudre plusieurs problèmes jusque-là sans réponse. Mais le prix était élevé. Les traits supplémentaires inclus dans le *package* diminuaient en quelque sorte la beauté de l'offre initiale – au moins, du point de vue de cer-

tains d'entre nous. D'autres pensaient que la géométrie des dimensions supérieures était ce qu'il y avait de plus beau dans toute la théorie. Il n'est pas étonnant que les théoriciens des deux côtés soient rapidement redescendus sur terre.

Ceux qui y croyaient, croyaient le plus souvent au *package* en entier. J'ai connu beaucoup de physiciens qui étaient persuadés que la supersymétrie et les dimensions supplémentaires étaient bel et bien là, avec nous, attendant qu'on les découvre. J'en ai connu autant qui abandonnaient ce domaine de recherche à ce moment-là, puisque cela signifiait, pour eux, accepter trop de choses sans fondement expérimental.

Parmi les détracteurs se trouvait Richard Feynman, qui a ainsi expliqué sa répugnance à partager l'excitation générale :

> Je n'aime pas le fait qu'ils ne calculent rien. Je n'aime pas le fait qu'ils ne vérifient pas leurs idées. Je n'aime pas que pour toute chose qui est en désaccord avec l'expérience, ils créent tout de suite une explication comme quand on dit : « Ouais, cela est peut-être quand même vrai. » Par exemple, la théorie a besoin de dix dimensions. Voyons, peut-être existe-t-il une façon d'en boucler six. Oui, du point de vue des mathématiques, c'est possible. Mais pourquoi pas sept ? Lorsqu'ils écrivent leurs équations, ce sont elles qui doivent décider combien de ces choses vont être enroulées – et non pas le désir d'être en accord avec l'expérience. En d'autres termes, il n'existe en théorie des cordes aucune raison qu'il n'y ait pas huit parmi les dix dimensions qui soient bouclées ; le résultat aurait été bidimensionnel et cela aurait été en désaccord total avec l'expérience. Par conséquent, le fait que cela puisse être en désaccord avec l'expérience est très ténu ; ça ne donne rien ; la plupart du temps, il faut l'excuser. Ce n'est pas correct[14].

Ces sentiments étaient partagés par beaucoup de physiciens des particules de la vieille génération, qui savaient que le succès d'une théorie des particules a toujours nécessité une interaction permanente avec la physique expérimentale. Un autre dissident, était Sheldon Glashow, prix Nobel de physique pour son travail sur le modèle standard :

> Mais les théoriciens des supercordes ne nous ont pas encore montré que leurs théories marchent réellement. Ils ne parviennent pas à démontrer que le modèle standard est une conséquence logique de la théorie des cordes. Ils ne peuvent même pas être sûrs que leur formalisme inclut une description des choses comme les protons et les électrons. Et ils n'ont pas encore fait la moindre prédiction expérimentale. Encore pire, la théorie des supercordes ne vient pas comme conséquence logique de quelques hypothèses plausibles sur la nature. On peut se demander pourquoi les théoriciens des cordes insistent sur le fait que l'espace ait neuf dimensions. La réponse en serait simplement parce que dans toute autre sorte d'espace, la théorie des cordes n'a aucun sens[15]...

Pourtant, au-delà de la controverse, il y avait un réel besoin de mieux comprendre la théorie. Une théorie qui se présentait dans un tel nombre de versions ne ressemblait pas à une théorie unique. Les théories différentes semblaient être, au mieux, les solutions diverses d'une autre théorie, encore inconnue.

Nous sommes habitués à l'idée qu'une théorie ait plusieurs solutions. Les lois de Newton par exemple décrivent le déplacement des particules en réponse aux forces. Supposez qu'on fixe les forces. On veut alors décrire un ballon qu'on jette dans le champ gravitationnel de la Terre. Les équations de Newton ont un nombre infini de solutions, corres-

pondant au nombre infini de trajectoires que peut suivre le ballon : il peut aller plus haut ou plus bas, plus vite ou plus lentement. Chacune des façons de jeter le ballon produit une trajectoire différente des autres, dont toutes sont des solutions des équations de Newton.

La relativité générale admet également un nombre infini de solutions, dont chacune est un espace-temps – c'est-à-dire, une histoire possible de l'univers. Puisque la géométrie de l'espace-temps est une entité dynamique, elle peut exister sous une infinité de configurations diverses et évoluer en une infinité d'univers différents.

Chaque fond spatio-temporel sur lequel on définit une théorie des cordes est une solution de l'équation d'Einstein ou d'une généralisation de celle-ci. Ainsi, les physiciens ont commencé à comprendre que l'augmentation du catalogue des différentes théories des cordes ne signifiait rien d'autre que le fait que nous n'étions pas, en fait, en train d'étudier la théorie fondamentale. Peut-être que ce que nous faisions n'était que l'étude des *solutions* d'une autre théorie, plus profonde, encore inconnue. On peut l'appeler « métathéorie », parce que chacune de ses solutions est, en soi, une théorie. Cette métathéorie serait la vraie loi fondamentale, dont chaque solution produirait une théorie des cordes.

Ainsi, il serait plus prometteur de penser non pas à l'infinité des théories des cordes, mais à une infinité de solutions provenant toutes d'une seule et unique théorie fondamentale.

Rappelez-vous que chacune des théories des cordes est une théorie dépendante du fond, qui décrit les cordes en train de se déplacer sur un fond spatio-temporel particulier. Puisque les différentes théories approximées vivent sur des fonds différents, la théorie qui les unifie *ne doit pas vivre sur un fond spatio-temporel*. Ce qu'il nous faut pour les unifier, c'est donc l'unique théorie indépendante du fond. La façon d'y arriver est claire : inventer une métathéorie qui serait elle-même indépendante du fond ; ensuite, dériver toutes les théories des cordes dépendantes du fond de cette métathéorie unique.

Voici donc deux raisons de chercher une théorie quantique de la gravitation, indépendante du fond. Nous savions déjà qu'il fallait réaliser dans cette théorie le caractère dynamique de la géométrie donné par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Désormais, nous en avions également besoin pour unifier les différentes théories des cordes. Y parvenir exigeait l'apparition d'une idée nouvelle ; pour l'instant, cela restait hors de portée.

Une des choses qu'on attendait de la métathéorie était de nous aider à reconnaître quelle version de la théorie des cordes était physiquement réalisée. Puisqu'il était de croyance commune que la théorie des cordes était l'unique théorie unifiée, beaucoup de théoriciens s'attendaient à ce qu'un grand nombre d'alternatives soient instables et que la seule théorie vraiment stable explique sans équivoque les constantes du modèle standard.

Vers la fin des années 1980, une autre possibilité m'est venue à l'esprit. Toutes les théories des cordes étaient peut-être valides à parts égales. Cela impliquait une révision complète de nos attentes par rapport à la physique. En effet, cela rendait toutes les propriétés des particules élémentaires contingentes – déterminées non pas par la loi fondamentale, mais par une seule parmi l'infinité des solutions de la théorie fondamentale. Il existait déjà des indications que cette contingence pouvait se produire dans les théories, avec la brisure spontanée de symétrie, mais le fait d'avoir autant de versions de la théorie des cordes ou-

vrait la possibilité que cela soit également vrai pour plus ou moins toutes les propriétés des particules élémentaires et des forces.

Cela signifiait que les propriétés des particules élémentaires étaient contextuelles et pouvaient changer avec le temps. Si cela était vrai, cela voulait dire que la physique ressemblait plus à la biologie, dans le sens où les propriétés des particules élémentaires dépendaient de l'histoire de l'univers. La théorie des cordes ne serait alors pas la théorie unique, mais un *paysage de théories* – par analogie au *paysage de fitness*[*] qu'étudient les biologistes de l'évolution. Il pourrait même y avoir un processus de même nature que la sélection naturelle à l'œuvre, qui aurait sélectionné la version qui s'applique à notre univers. (Ces idées ont mené, en 1992, à un article intitulé « L'univers a-t-il évolué ? »[16] et, en 1997, au livre *La Vie du cosmos*. Nous y reviendrons plus loin.)

Chaque fois que j'ai discuté de ces idées évolutionnistes avec les théoriciens des cordes, ils m'ont dit : « Ne t'inquiète pas, nous allons trouver une version unique de la théorie des cordes, sélectionnée par un principe qu'on ne connaît pas encore. Quand nous l'aurons trouvé, ce principe expliquera correctement tous les paramètres du modèle standard et mènera à des prédictions uniques pour les expériences à venir. »

Quoi qu'il en fût, le progrès en théorie des cordes s'est ralenti, et au début des années 1990 les théoriciens des cordes avaient déjà perdu courage. Il n'y a pas eu de formulation complète de la théorie des cordes. Tout ce que nous avions n'était qu'une liste de centaines de milliers de théories différentes, dont chacune possédait beaucoup de constantes libres. On n'a eu aucune idée précise de laquelle parmi les différentes versions de la théorie correspondait à la réalité. Et bien que le progrès technique ait été considérable, aucun indice décisif n'en a émergé, qui aurait pu nous dire si la théorie des cordes était valable ou pas. Pire encore, pas une seule prédiction n'en était issue qui aurait pu être confirmée ou falsifiée par une expérience réalisable.

Il existe aussi d'autres raisons pour lesquelles les théoriciens des cordes sont découragés. La fin des années 1980 a été une époque favorable pour l'ensemble du domaine. Immédiatement après la révolution de 1984, les inventeurs de la théorie des cordes, comme John Schwarz, ont reçu de nombreuses et tentantes propositions de la part des meilleures universités. Pendant quelques années, les jeunes théoriciens des cordes pouvaient trouver des postes sans problème. Pourtant, au début des années 1990, la situation a changé, et de jeunes chercheurs plein de talents se sont retrouvés de nouveau sur le marché du travail.

C'est à ce moment que certains chercheurs, des vieux et des jeunes, ont abandonné ce domaine de recherche. Heureusement pour eux, travailler en théorie des cordes avait été un entraînement intellectuel formidable, et ils ont mis leur talent en pratique dans d'autres domaines tels que la physique des solides, la biologie, les neurosciences, l'informatique et les finances.

[*] Les paysages de fitness, introduits par S. Wright en biologie de l'évolution en 1930, représentent l'ensemble des solutions potentielles d'un problème, par exemple l'ensemble de tous les organismes possibles et leur adaptabilité. C'est un concept pertinent pour modéliser l'évolution d'une population. (N.d.E.)

Mais d'autres sont restés en lice. Malgré toutes les raisons de se décourager, beaucoup de théoriciens des cordes n'ont pas voulu abandonner l'idée que leur théorie n'était rien de moins que l'avenir même de la physique. S'il restait des problèmes, les autres approches de l'unification de la physique n'avaient pas réussi non plus. Il y avait bien des physiciens encore intéressés par la gravité quantique, mais la plupart des théoriciens des cordes n'en étaient absolument pas conscients. Pour beaucoup d'entre eux, la théorie des cordes était le seul jeu valant la peine d'être joué dans ce monde. Même si le chemin se révélait plus difficile que ce à quoi ils s'étaient attendus, aucune autre théorie n'avait promis d'unifier toutes les particules et toutes les forces et d'unifier la gravité quantique – et tout cela dans un cadre finitaire et cohérent.

Malheureusement, le fossé entre partisans et sceptiques s'en est trouvé creusé, chacun se retranchant plus profondément dans sa position. Cela aurait pu demeurer ainsi, mais des événements spectaculaires advinrent qui changèrent radicalement notre appréciation de la théorie des cordes.

9
La révolution numéro deux

La théorie des cordes s'est initialement proposée d'unifier toutes les particules et toutes les forces de la nature. Mais durant les dix années d'étude acharnée de la théorie qui suivirent la révolution de 1984, quelque chose d'inattendu survint. La prétendue théorie unifiée se fractura en plusieurs morceaux, chacun représentant une théorie à lui seul : les cinq théories des supercordes cohérentes dans l'espace-temps à dix dimensions, plus des millions de variantes dans les situations où quelques dimensions seraient courbées. Avec le temps, il devint clair que la théorie des cordes devait elle-même être unifiée.

La deuxième révolution des supercordes, en 1995, fournit précisément cette nouvelle unification. L'acte de naissance de cette révolution fut l'exposé d'Edward Witten au mois de mars de cette même année, au cours du colloque sur la théorie des cordes qui s'est tenu à Los Angeles, lors duquel il énonça une nouvelle idée unificatrice. Il ne présenta pas de nouvelle théorie unifiée des supercordes ; simplement, il proposa que celle-ci existât déjà et en décrivit quelques traits. L'idée de Witten était fondée sur une série de découvertes récentes, qui avaient mis en lumière des aspects nouveaux de la théorie des cordes et sérieusement amélioré notre compréhension de cette théorie. Ces aspects avaient également permis d'avancer dans l'unification de la théorie des cordes avec les théories de jauge et de la relativité générale, exposant plusieurs nouveaux points communs essentiels. Ces avancées, dont certaines sans précédent dans l'histoire de la physique théorique moderne, avaient finalement persuadé beaucoup de sceptiques, dont moi-même. S'il nous avait semblé que les cinq théories cohérentes des supercordes décrivaient des mondes différents, au milieu des années 1990, nous avons commencé à comprendre qu'ils n'étaient pas si différents que ça.

Lorsqu'il existe deux façons d'analyser le même phénomène, on parle de « dualité ». Demandez à des époux, deux membres d'un couple, de vous raconter séparément l'histoire de leur relation. Les deux histoires ne seront pas les mêmes, mais chaque événement important relaté par un des deux protagonistes correspondra à un événement important de l'autre histoire. Si vous leur parlez assez longtemps, vous apprendrez à discerner en quoi les deux histoires correspondent et en quoi elles se différencient. Par exemple, la perception par le mari du trop plein d'assurance de sa femme pourrait correspondre à la per-

ception, par la femme, d'une espèce de passivité chez son mari. On dit alors que les deux descriptions sont duales.

Les théoriciens des cordes, dans leurs efforts pour trouver des relations entre les cinq théories, ont commencé à parler de dualité. Certaines dualités sont *exactes*, c'est-à-dire que les deux théories ne sont pas vraiment différentes, mais constituent simplement deux manières de décrire le même phénomène. D'autres dualités sont *approximatives*. Dans ce dernier cas, les deux théories sont réellement différentes, mais il existe des phénomènes dans l'une qui sont similaires à des phénomènes dans l'autre, menant à des approximations aidant à comprendre quelques traits de la première théorie par l'étude de la seconde.

La dualité la plus simple parmi celles qu'on observe entre les cinq théories des cordes s'appelle « T-dualité ». « T » signifie « topologique », puisque cette dualité est liée à la topologie de l'espace. Elle surgit lorsqu'une des dimensions compactifiées est un cercle. Dans ce cas-là, la corde peut s'enrouler autour du cercle ; en fait, elle peut s'enrouler même un certain nombre de fois (voir figure 9). Ce nombre s'appelle « numéro d'enroulement ».

Un autre nombre mesure la vibration de la corde. Celle-ci a des harmoniques, précisément comme une corde de piano ou de guitare, et les nombres entiers expriment les différents niveaux de vibration.

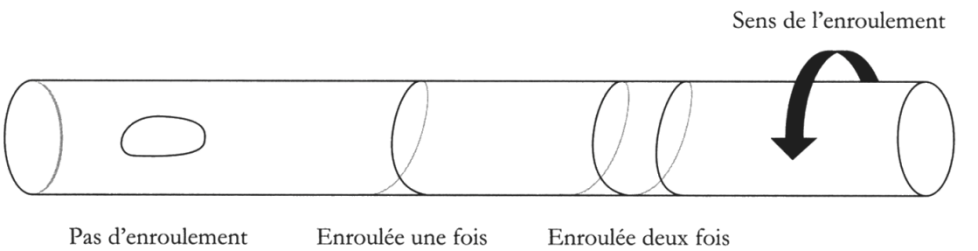


Figure 9. Les cordes peuvent s'enrouler autour d'une dimension cachée.
Ici, l'espace est unidimensionnel et la dimension cachée est un petit cercle. Des cordes s'y enroulent zéro, une, ou deux fois.

La T-dualité est une relation entre deux théories des cordes où une dimension compactifiée s'enroule autour d'un cercle. Les diamètres des deux cercles sont différents, mais sont liés l'un à l'autre ; plus particulièrement, l'un est l'inverse de l'autre (dans l'unité de longueur des cordes). Dans ce cas, les états d'enroulement de la première théorie des cordes se comportent précisément comme les niveaux de vibration de la seconde. Il s'avère que ce type de dualité existe entre certaines paires parmi les cinq théories des cordes. Au début, elles nous paraissent distinctes, mais quand on enroule leurs cordes sur des cercles, elles se fondent en une même théorie.

Il existe un deuxième type de dualité, dont on suppose qu'elle est exacte, quoique cela n'ait pas été prouvé. Rappelez-vous (cf. chapitre 7) que, dans chaque théorie des cordes, il existe une constante qui détermine la probabilité que la corde se casse ou se rejoigne. C'est la constante de couplage de la corde qu'on dénote par convention par la lettre g. Quand g est petit, la probabilité pour que les cordes se cassent et se rejoignent est petite, et on dit

que les interactions sont faibles. Quand *g* est grand, les cordes se cassent et se rejoignent tout le temps, et on dit que les interactions sont fortes.

Maintenant, il se peut que deux théories soient liées par la relation suivante. Chacune a une constante de couplage *g*. Quand *g* de la première théorie est égal à l'inverse de *g* de la seconde, les deux théories se comportent de façon identique. Cela s'appelle *S-dualité* (« S » pour *strong-weak*, ou « fort-faible »). Si *g* est petit, ce qui signifie que les cordes interagissent faiblement, l'inverse de *g* est grand et les cordes de la seconde théorie interagissent fortement.

Comment est-il possible que ces deux théories se comportent de façon identique, si leurs constantes de couplage sont différentes ? N'est-il pas possible de prédire la probabilité, petite ou grande, pour que les cordes se cassent et se rejoignent ? Ceci est tout à fait possible à condition que l'on sache ce que sont les cordes. Mais ce que l'on espère, dans les cas de S-dualité, est que ces théories ont plus de cordes qu'elles ne le devraient.

La prolifération des cordes est un exemple du phénomène répandu, mais rarement compris, qu'on appelle « émergence ». Ce terme évoque l'apparition de propriétés nouvelles dans les systèmes complexes de grande taille. On peut connaître les lois auxquelles satisfont les particules élémentaires, mais là où beaucoup de particules sont liées ensemble, surgissent toute sorte de phénomènes nouveaux. Une poignée de protons, neutrons et électrons peuvent se combiner pour former un métal ; les mêmes peuvent se combiner pour former une cellule vivante. Le métal et la cellule vivante ne sont, tous les deux, que des collections de protons, de neutrons et d'électrons. Comment est-il donc possible de décrire ce qui fait d'un métal, un métal, et d'une bactérie, une bactérie ? Les propriétés qui les distinguent sont des *propriétés émergentes*.

Voici un exemple. La chose la plus simple que peut faire un métal est peut-être de vibrer. Si l'on frappe sur l'extrémité d'une bande métallique, une onde sonore se propagera à travers la bande. La fréquence avec laquelle le métal vibre est une propriété émergente, de même que la vitesse du son qui traverse le métal. Rappelez-vous la dualité onde-particule de la mécanique quantique, qui dit qu'à chaque particule est associée une onde. L'inverse est aussi vrai : à chaque onde est associée une particule, y compris la particule associée à l'onde sonore qui traverse le métal. Celle-ci s'appelle « phonon ».

Le phonon n'est pas une particule élémentaire. Il n'est certainement pas l'une des particules qui constituent le métal, puisqu'il n'existe que grâce au mouvement collectif d'un grand nombre de particules, qui, elles, constituent réellement le métal. Mais le phonon reste néanmoins une particule. Il a toutes les propriétés d'une particule, comme la masse, l'impulsion, et il porte une énergie. Il se comporte exactement de la façon dont une particule doit se comporter selon la mécanique quantique. On dit que le phonon est une « particule émergente ».

On pense qu'il se passe quelque chose de semblable avec les cordes. Lorsque les interactions sont fortes, il y a beaucoup, vraiment beaucoup de cordes qui se cassent et se rejoignent, et il devient difficile de suivre ce qui se passe avec chaque corde individuellement. Puis, on cherche quelques propriétés émergentes fondamentales des grands amas de cordes – les propriétés que l'on peut utiliser pour comprendre ce qui est en train de se produire.

C'est ici que tout devient vraiment très amusant. Exactement comme les vibrations d'un ensemble de particules peuvent se comporter comme de simples particules nouvelles – les phonons –, une nouvelle corde peut émerger à partir du mouvement collectif d'un grand nombre de cordes. On appelle cette corde « corde émergente ».

Le comportement des cordes émergentes se trouve à l'opposé exact de celui des cordes ordinaires ; appelons celles-ci « cordes fondamentales ». Plus les cordes fondamentales interagissent, moins les cordes émergentes le font. Pour être un peu plus précis : si la probabilité que deux cordes fondamentales interagissent est proportionnelle à la constante de couplage *g*, alors, dans certains cas, la probabilité pour que les cordes émergentes interagissent est proportionnelle à l'inverse de *g*.

Comment distinguer une corde fondamentale d'une corde émergente ? Il s'avère qu'on ne le peut pas – au moins, dans certains cas. En fait, on peut toujours inverser le point de vue et traiter les cordes émergentes comme des cordes fondamentales. C'est une particularité remarquable de la S-dualité. C'est comme si l'on pouvait regarder le métal et les phonons – les ondes sonores quantiques – comme fondamentaux et les protons, neutrons et électrons comme des particules émergentes composées de phonons.

Comme la T-dualité, la S-dualité relie aussi certains couples parmi les cinq théories des supercordes. La seule question est de savoir si cette relation s'applique seulement à quelques états au sein des théories, ou si elle est plus profonde. C'est un problème assez difficile à résoudre, puisque, pour pouvoir étudier cette relation, il faut analyser certains états particuliers des théories qui forment le couple – les états restreints par une certaine symétrie. Autrement, on ne peut pas avoir assez de contrôle sur les calculs pour qu'en sortent de bons résultats.

Deux voies seulement s'ouvraient aux théoriciens. Les optimistes – et à l'époque, la majorité des théoriciens des cordes étaient optimistes – sont passés outre ce qui pouvait être démontré rigoureusement et ont conjecturé que la relation entre les états symétriques particuliers, qu'ils savaient analyser dans les théories couplées, s'étendait aux *cinq* théories. En d'autres termes, ils postulaient que, même sans cette symétrie particulière, il existait toujours des cordes émergentes et qu'elles se comportaient toujours exactement comme les cordes fondamentales dans l'autre théorie. Cela impliquait que la S-dualité non seulement reliait quelques aspects des théories, mais montrait leur équivalence complète.

De l'autre côté, quelques pessimistes craignaient que les cinq théories soient réellement différentes les unes des autres. Ils trouvaient déjà assez surprenant qu'il existât même quelques situations où les cordes émergentes d'une théorie se comportent comme les cordes fondamentales d'une autre ; et ils savaient qu'un tel phénomène peut se produire même si les théories sont réellement différentes.

S'il s'avère que les optimistes ont raison, alors les cinq théories initiales des supercordes ne sont que des façons différentes de décrire la même théorie. S'il s'avère que ce sont les pessimistes qui ont raison, alors ces théories sont en effet toutes différentes, et, par conséquent, il n'y a pas d'unicité ni de théorie fondamentale. Tant qu'on ne sait pas si la S-dualité est approximative ou exacte, on ne sait pas non plus si la théorie des cordes est unique ou pas.

Un des éléments en faveur du point de vue optimiste était que des dualités similaires sont connues dans des théories plus simples et mieux comprises que la théorie des cordes, comme une version de la théorie de Yang-Mills qu'on appelle théorie « super-Yang-Mills N = 4 », qui possède autant de supersymétries que possible. Pour faire court, appelons-la « superthéorie maximale ». Il y a de bonnes raisons de croire que cette théorie admet un type de S-dualité. En gros, cela fonctionne ainsi : la théorie contient un certain nombre de particules chargées électriquement. Elle contient également des particules émergentes qui portent les charges magnétiques. Normalement, il n'y a pas de charges magnétiques dans la nature, mais seulement des pôles magnétiques. Chaque aimant en a deux, nord et sud. Mais, dans des situations particulières, il peut y avoir des pôles magnétiques émergents, qui se déplacent indépendamment les uns des autres – on les connaît sous le nom de « monopoles ». En superthéorie maximale s'établit une symétrie qui échange les places des charges électriques avec celles des monopoles magnétiques. Lorsque cela se produit, si l'on remplace simplement la valeur de la charge électrique par l'inverse de sa valeur initiale, on ne change strictement rien dans la physique décrite par la théorie. La superthéorie maximale est une théorie remarquable et, comme on le verra bientôt, elle a joué un rôle central dans la deuxième révolution des supercordes. Maintenant, puisque nous comprenons un peu mieux les différentes sortes de dualité, je peux expliquer la conjecture discutée par Witten dans son célèbre exposé de Los Angeles.

Comme vu précédemment, l'idée clef de l'exposé de Witten était de réunir les cinq théories des supercordes en une seule. Mais qu'était-elle alors, cette théorie unique ? Witten ne l'a pas dit, mais il a affirmé qu'elle requérait une dimension de plus, de sorte que l'espace avait maintenant dix dimensions, et l'espace-temps onze[17].

Cette conjecture avait déjà été émise, pour la première fois, par deux physiciens britanniques, Christopher Hull et Paul Townsend, un an plus tôt[18]. Witten a trouvé un grand nombre d'indications de la vraisemblance de cette conjecture, fondées sur les dualités découvertes non seulement entre les cinq théories, mais également entre les théories des cordes et les théories en onze dimensions.

Pourquoi la théorie unique des cordes devait-elle avoir une dimension de plus ? Une des caractéristiques de cette dimension supplémentaire – à savoir, le rayon du cercle supplémentaire dans la théorie de Kaluza-Klein – peut être interprétée comme un champ, qui varie à travers les autres dimensions. Witten a utilisé cette analogie pour suggérer qu'un certain champ dans la théorie des cordes n'était qu'un rayon du cercle qui s'étend dans la onzième dimension.

Comment cette introduction d'une autre dimension spatiale a-t-elle aidé à résoudre le problème ? Après tout, il ne pouvait pas y avoir de théorie cohérente supersymétrique des cordes en onze dimensions spatio-temporelles. Mais il existait une théorie supersymétrique de la gravitation en onze dimensions spatio-temporelles ! Comme je l'ai dit au chapitre 7, celle-ci possède, parmi toutes les théories de la supergravité, le nombre maximum de dimensions spatio-temporelles – un véritable Mont Blanc de la supergravité. Ainsi, Witten a conjecturé que le monde à onze dimensions, dont l'existence a été suggérée par le champ

supplémentaire, pouvait être décrit – en l'absence de la théorie quantique – par la supergravité en onze dimensions.

De plus, bien qu'il n'y ait pas de théorie des cordes en onze dimensions, il existe bien une théorie des surfaces bidimensionnelles en mouvement dans l'espace-temps à onze dimensions. Cette dernière théorie est assez belle, au moins au niveau classique. Elle fut inventée au début des années 1980 et on l'appelle, avec beaucoup d'imagination, « théorie des supermembranes en onze dimensions ».

Jusqu'à Witten, la majorité des théoriciens des cordes ne connaissaient rien de la théorie des supermembranes, pour une bonne raison : personne ne savait si cette théorie pouvait être rendue cohérente avec la mécanique quantique. Certains chercheurs avaient essayé de la combiner avec la théorie quantique, mais ces tentatives avaient échoué. Quand la première révolution des supercordes a eu lieu en 1984, fondée sur les propriétés magiques de cordes en dix dimensions, ces théories en onze dimensions ont été abandonnées par la plupart. Mais, à la suite de Witten, des théoriciens des cordes ont proposé de ranimer la théorie des supermembranes en onze dimensions, parce qu'ils se sont aperçus de quelques faits remarquables. Premièrement, si l'on prend une des onze dimensions pour un cercle, on peut alors enrouler une dimension de la membrane autour de ce cercle (voir figure 10). Cela laisse l'autre dimension de la membrane libre de se déplacer dans les neuf dimensions spatiales qui restent. Il s'agit, par conséquent, d'un objet unidimensionnel qui est en mouvement dans l'espace à neuf dimensions. Cet objet a précisément l'air d'une corde !

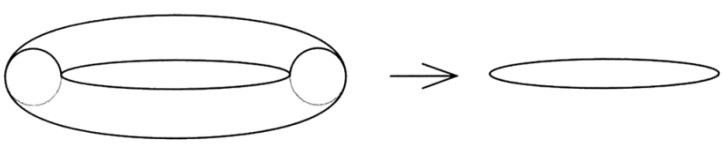


Figure 10. Sur la gauche, nous avons une membrane bidimensionnelle, que nous pouvons imaginer être enroulée autour d'une dimension cachée, ici un petit cercle. Vu de suffisamment loin (à gauche), cela ressemble à une corde enroulée autour de la dimension plus grande.

Witten a montré qu'il était possible d'obtenir les cinq théories cohérentes des supercordes par les différentes façons d'enrouler une dimension de la membrane sur un cercle ; plus encore, vous obtenez ces cinq théories, et aucune autre.

Ce n'est pas tout. Rappelez-vous que lorsqu'une corde est enroulée sur un cercle, il existe des transformations qu'on appelle des T-dualités. Contrairement aux autres types de dualité, on sait qu'elles sont exactes. On trouve également des transformations duales analogues lorsqu'une dimension de la membrane est enroulée sur un cercle. Si l'on interprète ces transformations dans les termes de la théorie des cordes que nous obtenons en enroulant la membrane, alors il est démontré que ces transformations sont exactement les S-dualités qui relient les théories des cordes. Vous vous rappelez peut-être aussi que les S-dualités sont des conjectures non démontrées, sauf dans des cas spéciaux. Nous savons

maintenant qu'elles proviennent des transformations de la théorie à onze dimensions. Cela semblait tellement parfait qu'il était difficile de ne pas croire en l'existence de la théorie unifiée en onze dimensions. Restait à la découvrir.

Plus tard dans la même année, Witten a nommé cette théorie encore inconnue. L'acte de baptême était un coup de génie : Witten l'a simplement appelée « M-théorie ». Il n'a pas voulu dire ce que signifiait le « M », parce que la théorie n'existait pas encore. C'était à nous de compléter son nom en la découvrant.

L'exposé de Witten souleva beaucoup d'objections. S'il avait raison, alors il restait beaucoup à faire. Joseph Polchinski, un théoricien des cordes qui travaillait à Santa Barbara, était présent dans la salle. Comme il le raconte, « après l'exposé d'Ed, pour mieux le comprendre, je me suis fait une liste de vingt problèmes à résoudre que je me donnais comme devoirs ». Ses devoirs lui ont permis de découvrir ce qui sera au cœur de la deuxième révolution des supercordes : la théorie des cordes n'est pas, en fait, une théorie des cordes. En dix dimensions, d'autres objets habitent l'espace-temps.

Ceux qui ne savent pas grand-chose à propos des aquariums pensent que tout ce qu'il y a à connaître à ce sujet, ce sont les poissons. Mais les passionnés d'aquariums savent que les poissons ne sont là que pour attirer un œil amateur. L'essentiel d'un aquarium en bonne santé est la vie végétale. Si vous essayez de ne mettre que des poissons dans un aquarium, il ne marchera pas bien. Celui-ci ressemblera bientôt à une morgue. Il s'avère que, pendant la première révolution des supercordes, de 1984 à 1995, nous n'étions que des amateurs qui essayaient de ne remplir les aquariums qu'avec des poissons. Nous ignorions l'élément principal nécessaire au système, jusqu'au jour où Polchinski l'a découvert.

En automne 1995, Polchinski a démontré que la théorie des cordes, pour être cohérente, devait contenir non seulement les cordes, mais aussi les surfaces de dimension supérieure qui se déplacent sur un fond spatial[19]. Ces surfaces sont aussi des objets dynamiques. Tout comme les cordes, elles sont libres de se déplacer dans l'espace. Si une corde, qui est un objet unidimensionnel, peut être fondamentale, alors pourquoi une surface bidimensionnelle ne pourrait pas l'être aussi ? En dimensions supérieures, où il y a plein d'espace, pourquoi pas une surface à trois, quatre ou même cinq dimensions ? Polchinski a montré que les dualités entre les théories des cordes ne seraient pas cohérentes s'il n'y avait pas dans la théorie des objets de dimension supérieure. Il les a appelées « D-branes » (le terme « brane » vient de « membrane », qui est une surface bidimensionnelle ; le « D » se réfère à un aspect technique que je ne tenterai pas d'expliquer ici). Les branes jouent un rôle particulier dans la vie des cordes : elles constituent les endroits où les cordes ouvertes peuvent se terminer. Normalement, les extrémités des cordes ouvertes se déplacent librement dans l'espace, mais parfois elles peuvent être contraintes de vivre à la surface d'une brane (voir figure 11), parce que les branes portent des charges électriques et magnétiques.

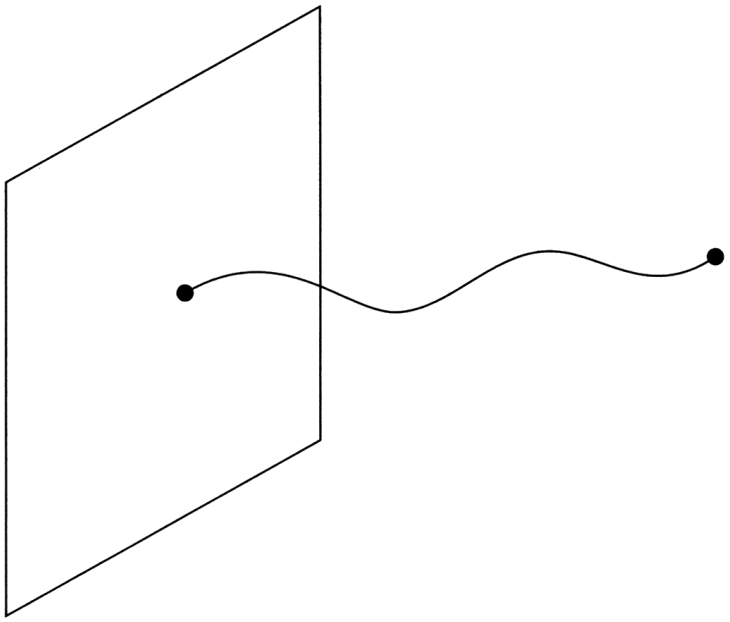


Figure 11. Une brane bidimensionnelle, sur laquelle une corde ouverte se termine.

Du point de vue des cordes, les branes sont des caractéristiques supplémentaires de la géométrie du fond. Leur existence enrichit la théorie des cordes en augmentant de façon très significative le nombre de géométries possibles où peut vivre une corde. À part l'enroulement des dimensions supplémentaires sur une quelconque géométrie compliquée, les autres options comprennent l'enroulement des branes sur les boucles et les surfaces de cette géométrie. On peut avoir autant de branes que l'on veut, et elles peuvent s'enrouler sur les dimensions compactifiées un nombre arbitraire de fois. C'est de cette manière que peuvent être construits une infinité de fonds différents pour la théorie des cordes. Le schéma de Polchinski allait avoir des conséquences majeures.

Les branes approfondissent aussi notre compréhension de la relation entre théories de jauges et théories des cordes. Elles y parviennent en offrant une voie nouvelle pour que les symétries puissent apparaître dans la théorie, à savoir en tant que résultats de l'empilement de quelques branes les unes au-dessus des autres. Comme je viens de le dire, les cordes ouvertes peuvent aboutir sur les branes. Mais si quelques branes se trouvent au même endroit, cela ne fait aucune différence si la corde aboutit sur une brane particulière ou une autre, ce qui signifie qu'il existe une espèce de symétrie qui s'en dégage. Or les symétries produisent des théories de jauge, ce que nous avons vu au chapitre 4. Par conséquent, on trouve ici un lien nouveau entre la théorie des cordes et les théories de jauge.

Les branes ouvrirent également une nouvelle perspective concernant les relations que notre monde tridimensionnel pourrait entretenir avec les dimensions spatiales supplémentaires de la théorie des cordes. Certaines parmi les branes découvertes par Polchinski sont tridimensionnelles. En les empilant les unes sur les autres, on obtient un monde à trois dimensions qui flotte dans un monde de dimension supérieure, avec autant de symétries qu'on le souhaite. Serait-il possible que notre univers tridimensionnel ne soit qu'une sur-

face dans un monde de dimension supérieure ? C'est une grande idée, qui rend possible le lien vers une discipline scientifique appelée « mondes des branes », où notre univers est perçu comme une surface qui flotte dans un univers de dimension supérieure.

Les branes ont permis tout ceci, mais elles ont fait plus encore. Elles ont rendu possible, à l'intérieur de la théorie des cordes, la description de quelques trous noirs particuliers. Cette découverte, réalisée par Andrew Strominger et Cumrun Vafa en 1996, compte parmi les plus grands résultats de la deuxième révolution des supercordes.

La relation entre les branes et les trous noirs est indirecte, mais puissante. Voici comment elle s'établit. On commence par éteindre la force gravitationnelle (on le fait en mettant la constante de couplage de la corde égale à zéro). Il peut paraître bizarre qu'un trou noir, qui n'est rien d'autre que de la gravité, puisse être décrit de cette façon ; mais suivons le fil des événements. Une fois la gravitation éteinte, on considère les géométries où plusieurs branes sont enroulées autour des dimensions supplémentaires. On utilise maintenant le fait que les branes portent des charges électriques et magnétiques. Il s'avère qu'il existe une limite à la quantité de charge que peut porter une brane, liée à sa masse. Les configurations portant une charge la plus grande possible sont très particulières ; on les appelle « configurations extrémales ». Elles comprennent, entre autres, une des situations spéciales dont nous avons parlé plus haut, où il existe des symétries supplémentaires qui nous permettent de faire des calculs plus précis. En particulier, ces situations se caractérisent par la présence de quelques supersymétries différentes, qui mettent en relation les bosons et les fermions.

Il existe aussi une quantité maximale de charge électrique et magnétique qu'un trou noir peut avoir tout en restant stable. Les trous noirs qui la possèdent sont qualifiés d'*extrémaux*, et les spécialistes en relativité générale les ont étudiés pendant des années. Si l'on étudie les particules qui se déplacent sur des fonds tels que ceux-ci, on trouve également une variété de supersymétries.

À notre grand étonnement, bien que la force gravitationnelle soit mise à zéro, les systèmes extrémaux des branes partagent quelques propriétés avec les trous noirs extrémaux. En particulier, les propriétés thermodynamiques des deux systèmes sont identiques. Ainsi, en étudiant la thermodynamique des branes extrémales enroulées sur les dimensions supplémentaires, on peut reproduire les propriétés thermodynamiques des trous noirs extrémaux.

Un des défis de la physique des trous noirs est d'expliquer les découvertes faites par Jacob Bekenstein et Stephen Hawking, du fait que les trous noirs ont une entropie et une température (voir chapitre 6). L'idée nouvelle issue de la théorie des cordes est que – au moins dans le cas des trous noirs extrémaux – on peut progresser en étudiant les systèmes analogues, des branes extrémales enroulées autour des dimensions supplémentaires. En fait, plusieurs propriétés des deux systèmes sont en correspondance parfaite. Cette coïncidence presque miraculeuse naît du fait que, dans les deux cas, il existe quelques transformations supersymétriques différentes reliant les fermions et les bosons. Ces transformations permettent de construire une puissante analogie mathématique, qui force la thermodynamique des deux systèmes à coïncider.

Mais ce n'était pas tout. On peut aussi étudier les trous noirs qui sont *presque* extrémaux, en ce qu'ils ont une charge légèrement inférieure à leur charge maximale. Du côté des branes, on peut aussi étudier des paquets de branes ayant elles aussi une charge légèrement inférieure à la maximale. La correspondance entre les branes et les trous noirs tient-elle toujours ? La réponse est oui, et elle est précise. Aussi longtemps que vous restez près des cas extrémaux, les propriétés des deux systèmes sont en parfaite correspondance. De chaque côté, il existe des relations compliquées mais précises entre la température et les autres quantités comme l'énergie, l'entropie et les charges. Les deux cas s'accordent très bien.

En 1996, j'ai assisté à l'exposé d'un jeune post-doc argentin du nom de Juan Maldacena, qui a évoqué ces résultats lors d'un colloque à Trieste où je me trouvais pendant l'été. J'ai été dérouté. La précision avec laquelle le comportement des branes coïncidait avec la physique des trous noirs m'a immédiatement convaincu de reprendre à nouveau mon travail sur la théorie des cordes. J'ai invité Maldacena à dîner dans une pizzeria avec vue sur l'Adriatique ; c'est à mon avis un des jeunes théoriciens des cordes les plus intelligents et les plus perspicaces que j'ai jamais rencontrés. Une des choses dont nous avons parlé ce soir-là, autour d'un verre de bon vin et d'une pizza, était de savoir si les systèmes des branes pourraient être plus que simplement des modèles de trous noirs. Était-il possible qu'ils fournissent une explication naturelle de l'entropie et de la température des trous noirs ?

Nous n'avons pas trouvé de réponse, et la question est restée ouverte. Tout dépend en fait du degré d'importance de ces résultats. Ici, nous avons rencontré une des situations évoquées plus haut, lorsqu'une symétrie supplémentaire mène à des découvertes très intéressantes. De nouveau, il existe deux points de vue. Celui des pessimistes consiste à dire que la relation entre deux systèmes est probablement un résultat accidentel, dû au fait que les deux ont beaucoup de symétries supplémentaires. Pour un pessimiste, le fait que les calculs soient beaux n'implique pas qu'ils mènent nécessairement à de nouvelles découvertes sur les trous noirs en général. Au contraire, le pessimiste *s'inquiète* de la beauté des calculs, car ceux-ci dépendent de conditions très particulières qui ne sont pas validées par les trous noirs types.

L'optimiste, lui, soutient qu'on peut comprendre tous les trous noirs à l'aide des mêmes idées, et que les symétries supplémentaires, qui sont présentes dans les cas particuliers, permettent simplement de faire des calculs avec une plus grande précision. Comme dans le cas de S-dualité, on n'en sait pas assez pour pouvoir décider qui a raison : les optimistes ou les pessimistes. Mais dans ce dernier cas, il existe un problème supplémentaire, à savoir que les piles des branes ne sont pas, en soi, des trous noirs, car la force gravitationnelle a été éteinte. On a émis l'idée que ces piles deviendraient de vrais trous noirs si l'on pouvait allumer petit à petit la force gravitationnelle. En fait, on peut imaginer que cela se réalise en théorie des cordes, puisque la puissance de la force gravitationnelle est proportionnelle au champ qui peut varier dans l'espace et dans le temps. Mais le problème est qu'un tel processus, où le champ gravitationnel varie dans le temps, a toujours été trop complexe pour que la théorie des cordes le décrive concrètement.

Bien que son travail sur les trous noir soit déjà remarquable, Maldacena ne faisait que commencer. En automne 1997, il a publié un article stupéfiant, où il a proposé un nouveau type de dualité[20]. Les dualités dont il a été question jusqu'ici étaient des dualités entre des théories du même genre, qui vivent dans l'espace-temps avec le même nombre de dimensions. L'idée révolutionnaire de Maldacena était que la théorie des cordes puisse avoir une description duale dans les termes d'une théorie de jauge. L'idée est vraiment stupéfiante, car la théorie des cordes est une théorie de la gravitation, tandis que la théorie de jauge évolue dans un monde sans gravitation, sur un fond spatio-temporel fixe. En plus, le monde décrit par la théorie des cordes a plus de dimensions que la théorie de jauge qui le représente.

Une façon de comprendre la proposition de Maldacena est de se rappeler l'idée vue au chapitre 7, selon laquelle une théorie des cordes peut surgir à partir d'étude des lignes de flux du champ électrique. Ici encore, les lignes de flux du champ électrique deviennent des objets fondamentaux de la théorie. Étant unidimensionnels, ils ont l'air de cordes. On peut dire que les lignes de flux deviennent des cordes émergentes. Dans la majorité des cas, les cordes émergentes qui proviennent des théories de jauge ne se comportent pas comme les sortes de cordes dont parlent les théoriciens des cordes. En particulier, il semble qu'elles n'ont rien à voir avec la gravitation et qu'elles ne mènent pas à l'unification des forces.

Pourtant, Alexander Polyakov a suggéré que, dans certains cas, les cordes émergentes associées à la théorie de jauge pourraient se comporter comme les cordes fondamentales. Toutefois, les cordes de la théorie de jauge n'existeraient pas dans notre monde ; au contraire, par un tour de force de l'imagination des plus remarquables dans l'histoire du sujet, Polyakov a conjecturé qu'elles pourraient se mouvoir dans un espace avec une dimension supplémentaire[21].

Comment Polyakov a-t-il pu justifier cette dimension supplémentaire où se déplaceraient les cordes ? Il a découvert que, lorsqu'on les traite de façon quantique, les cordes possèdent une propriété émergente qui n'est rien d'autre que la possibilité d'être décrites par un nombre en chacun de leurs points. Or un nombre peut être interprété comme une distance. Polyakov a donc proposé d'interpréter le nombre attaché à chaque point de la corde comme indiquant le lieu qu'occupe ce point dans la dimension supplémentaire.

Cette nouvelle propriété émergente permettait tout à fait naturellement de voir les lignes de flux électrique du champ comme vivant dans un espace à une dimension supplémentaire. Ainsi, Polyakov a été amené à l'idée d'une dualité entre le champ de jauge dans le monde à trois dimensions spatiales, et une théorie des cordes dans un monde avec quatre dimensions spatiales.

Tandis que Polyakov énonçait une proposition générale de ce genre, c'est Maldacena qui l'a développée et concrétisée. Dans le monde qu'il a étudié, nos trois dimensions d'espace accueillent la superthéorie maximale – la théorie de jauge avec la quantité maximale de supersymétrie. Il a étudié les cordes émergentes qui surgissent en tant que description duale de cette théorie de jauge. En étendant l'argument de Polyakov, il a trouvé des indications suggérant que la théorie des cordes, qui décrit ces cordes émergentes, serait en

fait la théorie supersymétrique des cordes en dix dimensions. De neuf dimensions spatiales où vivent ces cordes, quatre sont comme celles qu'on trouve dans la conjecture de Polyakov. Il en reste encore cinq, qui sont des dimensions supplémentaires à la façon de Kaluza-Klein (voir chapitre 3) : on peut les enrouler de manière à former une sphère. Les quatre dimensions de Polyakov sont elles aussi courbes, mais d'une manière opposée à celle d'une sphère ; parfois, on dit que les espaces de ce genre ont une forme de selle (voir figure 12). Ils correspondent aux univers contenant de l'énergie noire négative.

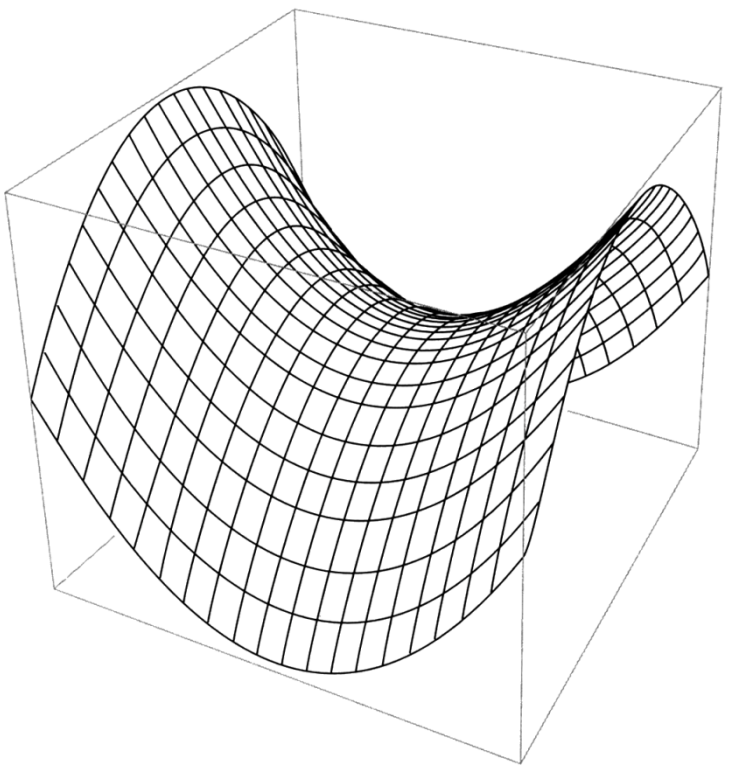


Figure 12. Une surface en « selle de cheval », ce qui correspond à la géométrie de l'espace dans un univers où l'énergie noire est négative.

La conjecture de Maldacena était beaucoup plus audacieuse que la proposition initiale de Polyakov. Elle a suscité un grand nombre de réactions et a servi de sujet à des milliers d'articles qui ont été écrits par la suite. Jusqu'à ce jour, elle n'a pas été prouvée, mais on a accumulé une quantité très importante d'indices d'une correspondance au moins approximative entre la théorie des cordes et la théorie de jauge.

Les enjeux étaient immenses – et ils le sont toujours. Si la conjecture de dualité de Maldacena est correcte et les deux théories équivalentes, alors on a une description quantique précise de la théorie quantique des cordes. Toute question que l'on souhaite poser à propos de la théorie supersymétrique des cordes peut être traduite par une question à propos de la superthéorie maximale, qui est une théorie de jauge. En principe, c'est déjà bien plus que ce que nous avons obtenu dans d'autres cas, lorsque la théorie des cordes n'était définie qu'à un niveau dépendant du fond et à l'aide d'une série d'approximations.

Pourtant, quelques doutes subsistent. Si elle est vraie, la conjecture de dualité ne peut être utile que si un des côtés de la relation duale peut être défini précisément. À ce jour, il n'a été possible de définir une version pertinente de la théorie des cordes que dans certains cas particuliers. On espérait donc retourner les choses à l'envers et utiliser la conjecture de dualité pour définir la théorie des cordes dans les termes de la superthéorie maximale. Mais, bien que l'on sache beaucoup plus de choses à propos de la superthéorie maximale, celle-ci n'a pas, non plus, été définie précisément. On pensait pouvoir le faire, mais des questions techniques complexes nous en ont pour l'instant empêché.

Si la conjecture de Maldacena est fausse, alors la superthéorie maximale et la théorie des cordes ne sont pas équivalentes. Pourtant, même dans ce cas, des indications importantes suggèrent des relations utiles entre les deux théories, à certains niveaux d'approximation. Ces approximations ne sont peut-être pas assez puissantes pour qu'on puisse redéfinir une théorie dans le langage de l'autre, néanmoins, elles ont rendu possible le calcul de quelques propriétés d'une théorie par rapport aux propriétés de l'autre. Un travail très fructueux a ainsi été accompli dans ce sens.

Par exemple, au niveau le plus bas d'approximation, la théorie à dix dimensions n'est qu'une version de la relativité générale, étendue à dix dimensions et pourvue de supersymétrie. Elle ne contient pas de mécanique quantique et elle est bien définie. Les calculs y sont faciles, comme par exemple l'étude de la propagation des différentes sortes d'ondes dans la géométrie de l'espace-temps à dix dimensions. Il est déjà remarquable que, même si elle n'est vraie qu'au niveau le plus bas d'approximation, la conjecture de Maldacena nous a permis de calculer certaines propriétés de la théorie de jauge correspondante dans notre monde tridimensionnel.

Cela a permis des percées dans la physique des autres théories de jauge. Finalement, il existe des preuves que – au moins, au niveau le plus bas d'approximation – les théories des cordes et les théories de jauges sont liées exactement comme le pensait Maldacena. Que la version forte de la conjecture de Maldacena soit vraie ou fausse – et même si la théorie des cordes elle-même est fausse –, nous avons déjà là un instrument puissant pour mieux comprendre les théories supersymétriques de jauge.

Après quelques années de travail intense, ces sujets restent confus. L'enjeu en est la signification exacte de la relation entre théorie des cordes et superthéorie maximale. La majorité des indications recueillies s'expliquent à l'aide de la version faible de la conjecture de Maldacena, qui demande seulement que certaines quantités d'une théorie soient calculables en utilisant les méthodes de l'autre et ceci seulement dans une certaine approximation. Comme je l'ai déjà dit, c'est en soi un résultat qui a déjà produit d'importantes applications. Mais la majorité des théoriciens des cordes croient en une version plus forte de la conjecture, selon laquelle les deux théories seraient équivalentes.

La situation rappelle celle de la S-dualité, où il n'est possible de démontrer les résultats les plus forts que pour des états très particuliers dotés de beaucoup de symétries supplémentaires. Comme pour la S-dualité, les pessimistes craignent que ce soient les symétries supplémentaires qui forcent les théories à s'accorder, et qu'elles ne le feraient pas sinon ;

les optimistes, eux, affirment que les résultats obtenus grâce aux symétries supplémentaires révèlent « sûrement » une vérité plus générale.

En fin de compte, il est essentiel de savoir si la conjecture de Maldacena est vraie ou non. En effet, elle a des conséquences importantes pour la description des trous noirs. Ceux-ci peuvent apparaître dans des univers avec l'énergie noire négative, et, par conséquent, on peut utiliser la conjecture de Maldacena pour étudier comment le paradoxe d'information des trous noirs, posé par Stephen Hawking, pourrait être résolu. En fonction de l'exactitude de la correspondance entre les deux théories, la solution du paradoxe ne sera pas la même.

Supposez qu'il existe seulement une correspondance partielle entre la théorie de la gravitation à l'intérieur d'un trou noir et la théorie de jauge. Dans ce cas, le trou noir peut piéger l'information en permanence – ou même transférer cette information à un autre univers né de la singularité au centre du trou noir, comme l'ont proposé à titre de spéculation, il y a bien longtemps, certains spécialistes comme John Archibald Wheeler ou Bryce DeWitt. Ainsi, l'information n'est pas perdue, puisqu'elle survit dans un autre univers, mais elle est perdue pour toujours pour l'observateur qui se trouve à la frontière du trou noir. Cette perte n'est possible que si la théorie de jauge à la frontière ne contient qu'une information partielle sur ce qui se passe à l'intérieur. Mais supposez maintenant que la correspondance entre les deux théories soit exacte. La théorie de jauge n'a ni horizons, ni singularités : aucun lieu où l'information pourrait être perdue. Si cela correspond exactement à l'espace-temps avec un trou noir, aucune information ne peut y être perdue non plus. Dans le premier cas, l'observateur perd son information ; dans le second, il la retient. Au jour où j'écris ces lignes, ce problème reste entier.

Comme nous l'avons vu, la supersymétrie joue un rôle fondamental dans la théorie des cordes. Les théories des cordes construites sans supersymétrie sont instables. Si on les abandonne à elles-mêmes, elles peuvent se mettre en mouvement dans le mauvais sens, en émettant de plus en plus de tachyons dans un processus sans fin, jusqu'à ce que la théorie se brise. Cela ne ressemble guère à notre monde. La supersymétrie élimine ce genre de comportement et stabilise les théories. Mais, de quelque façon que ce soit, elle le fait trop bien, car la supersymétrie implique l'existence d'une symétrie dans le temps, ce qui nous empêche de construire une théorie supersymétrique dans un espace-temps *qui évolue dans le temps*. Ainsi, l'aspect de la théorie nécessaire pour la stabiliser la rend également moins apte à nous fournir les réponses aux questions qu'on aimerait lui poser, comme ce qui s'est passé dans l'univers juste après le Big Bang, ou ce qui se passe loin derrière l'horizon d'un trou noir. Dans ces deux cas en effet, la géométrie évolue rapidement dans le temps.

Ceci est typique de ce que nous avons appris au cours de la deuxième révolution des supercordes. Notre compréhension s'est largement approfondie grâce à un ensemble de résultats fascinants et inattendus qui nous ont offert des suggestions très tentantes sur ce que pourrait être la vérité, si seulement on pouvait regarder derrière le voile et voir les choses telles qu'elles sont réellement. Mais quel que soit notre effort, beaucoup de calculs que nous souhaitions voir aboutir demeurent trop complexes pour qu'on puisse les aborder.

Pour avoir des résultats, il nous fallut sélectionner des exemples bien particuliers et des conditions spéciales. À plusieurs reprises, nous sommes restés incapables de dire si les calculs possibles amèneraient ou non des résultats susceptibles de nous aider à saisir la situation générale.

Personnellement, j'ai trouvé cette situation très frustrante. Soit nous étions en train de faire des progrès rapides vers la théorie ultime, soit nous nous étions agités pour rien, surinterprétant sans précaution les résultats et tirant chaque fois des seuls calculs que nous étions capables d'accomplir les conclusions les plus optimistes. Au milieu des années 1990, à chaque fois que j'évoquais ce problème à quelques leaders de la théorie des cordes, ils m'ont conseillé d'oublier mes soucis puisque la théorie était simplement plus intelligente que nous. Ils m'ont dit que nous ne pouvions pas poser de questions directes et nous attendre à recevoir des réponses. Toute tentative immédiate pour résoudre les grands problèmes était vouée à l'échec. Au contraire, il nous fallait faire confiance à la théorie et la suivre, en se contentant d'explorer les parties qu'elle voulait bien nous révéler, en utilisant nos méthodes de calcul imparfaites.

Il y avait un hic. Une version véritablement quantique de la M-théorie aurait dû être indépendante du fond, pour la même raison que toute théorie de la gravité quantique doit l'être. Mais, en plus des raisons déjà citées plus haut, la M-théorie aurait dû être indépendante du fond parce qu'on suppose que les cinq théories des supercordes, toutes avec leurs variétés et leurs géométries différentes, ne sont que des parties de celle-là. Ceci inclut les différentes façons d'enrouler ses géométries, dans toutes les dimensions spatiales de un à dix. Chacune de ces façons constitue un fond sur lesquels se déplacent les cordes et les branes. Alors, une unique théorie unifiée qui les inclurait ne peut pas alors être construite sur un fond donné, puisqu'elle doit inclure également tous les fonds évoqués.

Le problème clef de la M-théorie est, par conséquent, d'en trouver une formulation qui soit cohérente avec la théorie quantique *et* indépendante du fond. Le problème est essentiel, peut-être même est-il le plus essentiel parmi les problèmes de la théorie des cordes restés en suspens. Malheureusement, peu de progrès ont été faits. On a bien trouvé quelques indications surprenantes, mais on ne sait pas encore ce qu'est la M-théorie, ou même s'il existe une théorie digne de ce nom.

Des progrès ont été accomplis concernant l'approche quantique de la M-théorie, mais, là encore, sur un fond particulier. Ainsi, dans les années 1980, il y eut une tentative de créer une version quantique de la théorie de la membrane à onze dimensions. Trois physiciens européens – Bernard de Wit, Jens Hoppe et Hermann Nicolai – ont découvert qu'on pouvait la réaliser grâce à un procédé selon lequel la membrane est représentée par un tableau bidimensionnel de nombres – appelé par les mathématiciens « matrice ». Leur formulation demandait qu'on ait neuf tableaux de ce genre, et à partir de ces neuf tableaux, ils ont obtenu une théorie qui décrit approximativement le comportement de la membrane[22].

De Wit et ses collègues ont découvert que leur théorie des matrices pouvait être cohérente avec la théorie quantique. Il ne restait qu'un seul problème : pour pouvoir décrire les membranes, la matrice devait s'étendre à l'infini, tandis que la théorie quantique n'avait

de sens que si la matrice était finie. Par conséquent, l'hypothèse était que si la théorie quantique pouvait, de façon cohérente, être étendue aux tableaux infinis des nombres, alors elle produirait une théorie quantique des membranes.

En 1996, quatre théoriciens des cordes américains ont repris cette idée, mais en la modifiant. Thomas Banks, Willy Fischler, Stephen Shenker et Leonard Susskind ont avancé que, sur le fond de l'espace-temps plat à onze dimensions, la même théorie matricielle donne non seulement la théorie des membranes en onze dimensions, mais l'ensemble de la M-théorie[23]. Ce modèle matriciel ne nous dit pas ce qu'est la M-théorie pour autant, car il se place sur un fond particulier. Il fonctionne aussi avec quelques autres fonds, mais il ne peut pas fournir de réponses raisonnables si plus de quatre dimensions spatiales sont enroulées. Si la M-théorie est correcte, notre monde possède sept dimensions enroulées ; ce n'est alors pas suffisant. De plus, on ne sait toujours pas si la théorie quantique est entièrement cohérente dans le cas d'une matrice infinie.

Malheureusement, la M-théorie ne reste qu'une hypothèse très tentante. En l'absence de formulation réelle, elle n'est pas vraiment une théorie – elle n'est qu'une conjecture sur une théorie, à laquelle on aimerait bien croire.

Quand je réfléchis à notre relation avec la théorie des cordes pendant toutes ces années, je me rappelle l'histoire d'un marchand d'art, un de mes amis. Quand nous nous sommes rencontrés, il m'a dit être aussi le bon ami d'une jeune auteur dont j'avais beaucoup aimé le livre ; appelons-la M. Un beau jour, il m'appela et dit : « J'ai parlé avec M. dernièrement, et vous savez, elle est très intéressée par la science. Serait-il possible que vous vous rencontriez ? » J'étais évidemment terriblement flatté et excité, et j'ai accepté une première invitation à dîner. Au milieu d'un très bon repas, le portable du marchand d'art a sonné. « C'est M. », a-t-il annoncé. « Elle n'est pas loin. Elle aimerait bien venir et vous rencontrer. Cela vous va ? » Mais elle n'est pas venue.

Pendant le dessert, nous eûmes, avec le marchand d'art, une grande conversation sur la relation entre l'art et la science. Quelque temps après, ma curiosité à propos de l'éventuelle apparition de M. céda la place à ma gêne de paraître vouloir la rencontrer absolument, j'ai donc remercié mon ami et suis rentré chez moi.

Quelques semaines plus tard, mon ami m'a rappelé, s'est confondu en excuses et m'invita à nouveau pour la rencontrer. J'y suis allé, bien sûr. Au moins, il était clair qu'il dînait dans les meilleurs restaurants ; il m'apparut que les directeurs de certaines galeries d'art ont des frais de représentation qui excèdent les salaires des scientifiques universitaires. La même scène s'est répétée une nouvelle fois – et encore d'autres fois. Elle téléphonait, nous l'attendions une heure, parfois deux, et le téléphone sonnait à nouveau : « Ah oui, je vois, vous n'allez pas bien », ou : « Le chauffeur de taxi ne savait pas où était l'Odéon ? Il vous a emmenée à Brooklyn ? Mais qu'est-ce qui passe dans cette ville ? Oui, je suis sûr, très prochainement... » Après deux ans de ce traitement, je fus convaincu que la photo de la très belle femme sur la couverture des livres était fausse. Un soir, je dis à mon ami que j'avais finalement compris : il était M. Il sourit et répondit : « Hmm, oui... mais elle aurait tant aimé vous rencontrer. »

L'histoire de la théorie des cordes est comme celle de ma rencontre avec M., toujours reportée. Vous continuez de travailler sur un sujet même si vous savez qu'il n'est pas la chose réelle, mais votre meilleure façon de l'approcher. En attendant, la compagnie est charmante et le repas très bon. De temps en temps, vous entendez dire que la vraie théorie sera bientôt révélée, mais, bizarrement, cela n'arrive jamais. Au bout d'un moment, vous décidez d'aller la chercher vous-même. Chaque matin vous sentez le succès proche, mais il ne vient pas. À la fin, vous n'avez gagné que peu de terrain par rapport au point de départ : juste une belle photo sur la couverture d'un livre que vous ne pourrez jamais ouvrir.

10
Une théorie De Tout ce qu'on veut

L'observation expérimentale n'a joué presque aucun rôle dans les deux révolutions des cordes. Alors que le nombre de théories des cordes disponibles continuait de croître, la majorité des théoriciens des cordes croyaient toujours à la vision initiale d'une théorie unique, qui donnerait des prédictions uniques pour l'expérimentation ; aucun résultat n'allait cependant dans cette direction, et quelques théoriciens ont manifesté, tout au long du chemin, des doutes sur le fait qu'une théorie unique puisse jamais émerger. Les optimistes insistaient alors sur le fait qu'il fallait garder la foi et suivre la théorie là où elle nous mènerait. La théorie des cordes promettait tout ce que l'on attendait d'une théorie unifiée ; ce qui manquait encore pour achever l'histoire allait apparaître, certainement, un peu plus tard.

Pourtant, ces dernières années, nous avons enregistré un retournement total dans la façon de penser de nombreux théoriciens des cordes. Les espoirs portés par la théorie unique, nourris pendant si longtemps, ont laissé place à la conviction qu'il fallait prendre la théorie des cordes comme un paysage très large de théories possibles, chacune régissant une région particulière d'un univers multiple.

Qu'est-ce qui a produit un tel retournement des attentes ? Paradoxalement, il semble que ce soit la confrontation avec les données. Mais ce n'était pas les données auxquelles on s'attendait – au contraire, la plupart d'entre nous n'avaient jamais prévu que ce genre de données pourrait voir le jour.

Une bonne théorie doit surprendre ; cela signifie que celui qui l'a inventée a bien fait son travail. Mais lorsque c'est une *observation* qui les surprend, les théoriciens s'inquiètent. Aucune autre découverte des trente dernières années n'a été plus troublante que la découverte de l'énergie noire en 1998. Que disons-nous, quand nous disons que l'énergie est noire et qu'elle semble différente de toutes les formes d'énergie et de matière connues antérieurement ? Nous affirmons qu'elle n'est associée ni aux particules, ni aux ondes. Elle est là, c'est tout.

On ne sait pas ce qu'est l'énergie noire. Nous ne connaissons son existence que grâce à notre capacité à mesurer ses effets sur l'expansion de l'univers. Elle se manifeste en tant que source de gravitation répandue uniformément à travers l'espace, si bien que rien ne

tombe vers elle, puisqu'elle existe en même quantité partout. Le seul effet qu'elle produise est son influence sur la vitesse moyenne à laquelle les galaxies s'éloignent les unes des autres. Ainsi, en 1998, les observations des super-novæ dans des galaxies éloignées ont indiqué que l'expansion de l'univers s'accélérait d'une façon qui ne pouvait être expliquée au mieux que par l'existence de l'énergie noire[24].

Une des choses que pourrait être l'énergie noire est ce qu'on appelle souvent la « constante cosmologique ». Ce terme se réfère à une forme d'énergie dotée d'une caractéristique remarquable : la densité de cette énergie est exactement la même pour tous les observateurs, où qu'ils soient dans l'espace et le temps et quel que soit leur mouvement. Ce phénomène est très étrange. Normalement, l'énergie est associée à la matière, et il existe un observateur privilégié qui se déplace avec cette matière. La constante cosmologique est différente. On l'appelle « constante », parce qu'on obtient la même valeur universelle quels que soient le point et le moment où la mesure est faite et quelle que soit la vitesse de l'observateur. Puisqu'elle n'a ni origine ni explication en termes de particules ou d'ondes dans l'espace, on l'appelle « cosmologique » – c'est-à-dire qu'elle est une caractéristique de l'univers dans son ensemble, et non pas de quelque chose de concret et de particulier dans l'univers. (Je dois ajouter qu'on n'est pas encore sûr que l'énergie noire prenne, en réalité, la forme de la constante cosmologique ; toutes les indications que l'on a à ce jour le suggèrent, mais d'ici quelques années, on en aura appris beaucoup plus sur la question de savoir si la densité d'énergie est vraiment invariante dans l'espace et le temps.)

La théorie des cordes n'a pas prédit l'énergie noire ; pire, la valeur détectée a été très difficile à adapter à la théorie des cordes. Par conséquent, cette découverte a causé une véritable crise dans la discipline. Pour mieux en comprendre les raisons, je dois faire une pause, revenir en arrière et vous raconter l'étrange et honteuse histoire de la constante cosmologique.

L'histoire commence aux alentours de 1916 avec le refus d'Einstein de croire à la prédiction la plus spectaculaire de sa propre théorie, toute neuve à l'époque, la relativité générale. Il en acceptait la conclusion magistrale, le fait que la géométrie de l'espace et du temps évolue de façon dynamique. Lorsque les chercheurs ont commencé à appliquer la nouvelle théorie aux modèles de l'univers, Einstein n'aurait donc pas dû être surpris de découvrir que notre propre univers évolue de façon dynamique dans le temps, que ces univers modèles qu'ils étudiaient se contractaient et s'étendaient, et qu'ils avaient un début et une fin.

Il fut pourtant surpris par ses résultats – surpris et consterné. Depuis Aristote et jusqu'à cette date, l'univers était pensé comme statique. L'univers était peut-être créé par Dieu, mais si c'était le cas, il n'avait pas changé depuis. Einstein était le physicien le plus créatif depuis deux siècles et il connut un grand succès, mais même lui ne pouvait imaginer l'univers autrement qu'éternel et immuable. On est tenté de dire que si Einstein était vraiment génial, il aurait dû croire à sa théorie plus qu'à ses préjugés et qu'en conséquence, il aurait pu prédire l'expansion de l'univers. Il est toutefois plus productif de se rendre compte, justement, à quel point il est difficile – même pour les penseurs les plus aventureux – de renoncer aux croyances millénaires.

Nous qui sommes tant habitués à cette idée ne pouvons que spéculer sur la difficulté d'accepter que l'univers puisse avoir un début. À l'époque, il n'y avait pas de preuve que l'univers changeait ou évoluait dans le temps ; Einstein a donc pris les prédictions d'un univers en expansion comme le signe d'une erreur dans sa théorie. Il chercha donc à la réconcilier avec l'éternité de l'univers.

Il remarqua que ses équations sur la gravitation offraient une possibilité nouvelle, à savoir que la densité d'énergie de l'espace vide pourrait avoir une certaine valeur – en d'autres termes, qu'elle pourrait ne pas être égale à zéro. De plus, cette énergie universelle serait la même pour tous les observateurs, d'où qu'ils fassent leurs observations, qu'ils bougent ou non. Einstein l'a donc appelée « constante cosmologique ». Il a découvert que les effets de la constante cosmologique dépendaient de son signe. Quand elle est un nombre positif, elle pousse l'univers à s'étendre – et non seulement à s'étendre, mais à le faire avec un taux d'expansion croissant. Ceci est différent de l'effet produit par la matière ordinaire, qui, normalement, forcerait l'univers à se contracter par l'attraction gravitationnelle mutuelle de toute la matière contenue dans l'univers. Par conséquent, Einstein comprit qu'il pouvait utiliser la tendance expansionniste du nouveau terme dans l'équation pour équilibrer la contraction due à la force gravitationnelle, parvenant ainsi à un univers qui serait statique et éternel.

Plus tard, Einstein a qualifié la constante cosmologique de plus grande bévue de sa vie. En fait, c'était une double erreur. Premièrement, dès le début, elle n'a pas bien fonctionné : elle ne pouvait pas empêcher la contraction de l'univers. Il a été possible de compenser la contraction causée par la matière avec l'expansion produite par la constante cosmologique, mais seulement en un instant donné. Cet équilibre était profondément instable. Touchez un peu à l'univers, et il commencera à grandir ou à diminuer. Mais la vraie bévue tenait dans l'idée, fausse depuis le début, d'un univers statique. Dix ans plus tard, un astronome du nom d'Edward Hubble a commencé à récolter les signes de l'expansion de l'univers. Depuis les années 1920, la constante cosmologique n'était qu'une cause d'embarras, quelque chose dont il fallait se débarrasser. Mais plus on avançait dans les recherches, plus cela devenait problématique de le faire, au moins en théorie. Il était impossible de la poser simplement égale à zéro et de l'ignorer. Comme un éléphant dans un coin, elle était là même quand on prétendait que la pièce était vide.

Les chercheurs ont bientôt compris que la théorie quantique avait quelque chose à dire concernant la constante cosmologique. Malheureusement, son contenu était le contraire de ce qu'ils souhaitaient entendre. La théorie quantique – en particulier, le principe d'incertitude – semblait avoir besoin d'une énorme constante cosmologique. Si quelque chose est strictement au repos, alors sa position et son impulsion sont bien définis, mais cela contredit le principe d'incertitude selon lequel on ne peut jamais connaître ces deux grandeurs à la fois. Une conséquence en serait que même quand la température égale zéro, les choses continueraient de bouger. Il resterait une petite énergie résiduelle, associée à toutes les particules et tous les degrés de liberté, même à température zéro. Celle-ci s'appelle « énergie du vide » ou « énergie d'état fondamental ». Lorsqu'on applique la mécanique quantique à un champ, tel le champ électromagnétique, il existe ainsi une énergie

du vide pour chaque mode de vibration du champ. Mais le champ en possède plusieurs ; par conséquent, la théorie quantique prédit une énergie du vide de taille énorme. Dans le contexte de la théorie générale de relativité d'Einstein, ceci implique alors une très grande constante cosmologique. Pourtant, nous savons que ce n'est pas le cas, puisque cela aurait impliqué que l'univers se soit étendu si vite qu'aucune structure n'aurait pu s'être formée en son sein. Le fait qu'il existe des galaxies pose des limites très contraignantes pour la valeur de la constante cosmologique. Ces limites sont à peu près cent vingt ordres de grandeur plus petits que les prédictions fournies par la théorie quantique ; cela mérite le prix de la pire prédiction jamais faite par une théorie scientifique.

Quelque chose ne va pas dans cette histoire. Une personne rationnelle pensera qu'un concept radicalement nouveau est nécessaire, et qu'aucun progrès ne pourra être accompli dans l'unification de la gravitation et de la théorie quantique avant que cette contradiction ne soit résolue. Certains parmi les théoriciens les plus raisonnables ont effectivement pensé ainsi. Un d'entre eux est le physicien théoricien allemand Olaf Dreyer ; son opinion était que l'incompatibilité entre la théorie quantique et la relativité générale ne pouvait pas être résolue sauf si l'on abandonnait l'idée que l'espace est un concept fondamental. Son idée était que l'espace lui-même émerge d'une description plus fondamentale, qui sera assez différente de ce dernier. Le même point de vue est également soutenu par quelques théoriciens qui ont réalisé un travail formidable dans le domaine de la physique de la matière condensée, comme le prix Nobel Robert Laughlin et le physicien russe Grigori Volovik. Mais la majorité d'entre nous, qui travaillions en physique fondamentale, avons simplement ignoré cette question et poursuivi nos approches diverses même si, en fin de compte, celles-ci n'ont jamais fait avancer la résolution de ce problème.

Jusqu'à très récemment, quelque chose nous sauvait : au moins, la valeur observée de la constante cosmologique semblait égale à zéro : nous n'avions pas encore eu d'indications de l'accélération de l'expansion de l'univers. Cela était réconfortant, parce qu'il nous était permis de croire qu'un nouveau principe serait découvert un jour, qui éliminerait d'un coup l'embarras provenant des équations, et aurait rendu la constante cosmologique strictement égale à zéro. Cela aurait été infiniment pire si la valeur observée était un petit nombre différent de zéro, puisqu'il est beaucoup plus difficile d'imaginer un principe nouveau qui aurait réduit le nombre à une petite valeur non nulle. Ainsi, pendant des décennies, nous avons remercié les dieux – chacun le sien – de nous avoir évité cela.

La constante cosmologique posait problème dans tous les domaines de la physique, mais la théorie des cordes s'en sortait un peu mieux que les autres. Elle ne pouvait pas non plus expliquer pourquoi la constante cosmologique était égale à zéro, comme on le croyait. Mais, au moins, elle expliquait pourquoi elle n'était pas positive : les théories des cordes connues à l'époque impliquaient qu'elle ne pouvait être que nulle ou négative. Je ne connais aucun théoricien des cordes qui a explicitement prédit que la constante cosmologique ne pouvait pas être positive, mais ceci était sous-entendu dans toute la communauté scientifique, en tant que conséquence de la théorie. Les raisons sont trop techniques pour être exposées ici.

En fait, des théories des cordes ont été étudiées avec une constante cosmologique négative. La fameuse conjecture de Maldacena, par exemple, impliquait nécessairement un espace-temps avec une constante cosmologique négative. Il y avait un grand nombre de difficultés, et à ce jour personne n'a explicitement exposés tous les détails de la théorie des cordes dans un monde à constante cosmologique négative. Mais ce manque d'explicitation n'est considéré que comme un problème technique – il n'existe aucune raison connue qui expliquerait pourquoi cela ne devrait pas être possible en principe.

Vous pouvez donc vous imaginer quelle fut notre surprise lorsqu'en 1998, les observations des supernovæ ont commencé à montrer un taux croissant de l'expansion de l'univers, ce qui signifiait une valeur positive pour la constante cosmologique. Cela a donné lieu à une véritable crise, parce qu'on assistait à un désaccord explicite entre l'observation et la prédiction de la théorie des cordes. En effet, il existait des théorèmes montrant que les univers à constante cosmologique positive – au moins, tant qu'on néglige les effets quantiques – ne pouvaient pas être des solutions de la théorie des cordes.

Edward Witten n'est pas quelqu'un de très pessimiste, mais même lui a déclaré catégoriquement, en 2001 : « Je ne connais aucune façon nette d'obtenir l'espace de Sitter [un univers avec la constante cosmologique positive] à partir de la théorie des cordes et de la M-théorie[25]. »

Les philosophes et les historiens des sciences, dont Imre Lakatos, Paul Feyerabend et Thomas Kuhn, ont tous écrit qu'une seule anomalie expérimentale suffit rarement à tuer une théorie. Si un groupe de théoriciens y croit avec assez de force, ils prendront des mesures encore plus extrêmes pour la sauver. Ce n'est pas toujours dommageable pour la science et, parfois, ce fut très utile : lorsque les défenseurs de la théorie parviennent à la sauver et aboutissent à de nouvelles grandes découvertes complètement inattendues. Mais, de temps à autre, ils échouent et perdent beaucoup d'énergie à creuser un sujet inutilement. L'histoire de la théorie des cordes ces dernières années ressemble fort à celles que Lakatos ou Feyerabend ont écrites, l'histoire d'un groupe de théoriciens qui font de leur mieux pour sauver leur chère théorie en dépit des données qui la contredisent.

Ce qui a sauvé la théorie des cordes – pour autant qu'elle l'ait été – était la solution qu'elle apportait à un problème complètement différent : comment rendre stables les dimensions supérieures. Rappelez-vous que, dans les théories à dimensions supérieures, l'enroulement des dimensions supplémentaires résulte de l'abondance des solutions. Celles qui pourraient potentiellement correspondre au monde où nous vivons sont très particulières, en ce qu'on doit garder gelés certains aspects de la géométrie des espaces de dimension supérieure. Sinon, une fois que la géométrie commence à évoluer, elle pourrait continuer à le faire jusqu'à arriver à la singularité ou peut-être à une expansion si forte que les dimensions enroulées deviennent aussi grandes que celles que l'on observe.

Les théoriciens des cordes ont appelé cela « problème de la stabilisation des modules », « modules » étant un nom générique pour les constantes qui expriment les propriétés des dimensions supplémentaires. La théorie des cordes devait résoudre ce problème, mais pendant longtemps on ne sut pas clairement comment elle y parviendrait. Comme

d'habitude, les pessimistes s'inquiétaient, tandis que les optimistes pensaient bien que tôt ou tard, on trouverait une solution.

Ici, les optimistes avaient raison. Un progrès fut réalisé dans les années 1990 lorsque quelques théoriciens californiens ont compris que la clef du problème était l'utilisation des branes pour stabiliser les dimensions supérieures. Pour comprendre ceci, il nous faut apprécier une caractéristique particulière de la théorie : la géométrie des dimensions supérieures peut varier de façon continue tout en restant un fond correct pour la théorie des cordes. En d'autres termes, on peut modifier le volume ou la forme des dimensions supérieures. Ceci revient à forcer ces dimensions à traverser un « espace » comprenant plusieurs théories des cordes. Autrement dit, rien n'empêcherait la géométrie des dimensions supérieures d'évoluer dans le temps. Pour empêcher cette évolution, on a dû trouver une classe de théories des cordes qu'il était impossible de déplacer gratuitement dans cet espace. Une façon de le faire a été de trouver les théories des cordes pour lesquelles toute modification était un pas discret – c'est-à-dire que, au lieu de passer d'une théorie à l'autre d'une façon lisse, il fallait des changements abrupts et importants.

Joseph Polchinski nous a appris qu'il existe en effet des objets discrets en théorie des cordes, à savoir, les branes. Rappelez-vous qu'il existe des fonds (pour les cordes) dans lesquels les branes sont enroulées autour des surfaces, dans les dimensions supplémentaires. Les branes viennent en unités discrètes. On peut en avoir 1, 2, 17 ou 10 239 239, mais pas 1,003. Puisque les branes portent des charges électriques et magnétiques, cela donne lieu à des quantités discrètes de flux électrique et magnétique.

Ainsi, à la fin des années 1990, Polchinski – qui travaillait avec un post-doc doté d'une certaine imagination du nom de Raphael Bousso – a abordé l'étude des théories des cordes dans lesquelles des grandes quantités d'unités de flux électrique sont enroulées autour de dimensions supplémentaires. Ils ont réussi à obtenir des théories où certains paramètres ne pouvaient plus varier de façon continue.

Cela nous permettait-il de geler les constantes ? Pour y parvenir, on avait besoin d'une construction beaucoup plus compliquée, mais la réponse donnée a eu, gratuitement, un bénéfice inattendu : elle a produit une *théorie des cordes à constante cosmologique positive*.

La percée essentielle fut faite au début de 2003, par un groupe de scientifiques de Stanford comprenant Renata Kallosh, pionnière de la supergravité et de la théorie des cordes ; Andrei Lindé, qui est parmi les découvreurs de l'inflation, et deux parmi les meilleurs jeunes théoriciens des cordes, Shamit Kachru et Sandip Trivedi[26]. Leur travail est compliqué, même selon les standards de la théorie des cordes ; il fut baptisé le « machin de Rube Goldberg » par leur collègue de Stanford, Leonard Susskind. Mais il a eu un grand impact, car il résout le problème de la stabilisation des dimensions supplémentaires et rend la théorie des cordes cohérente avec nos observations de l'énergie noire.

Voici une version simplifiée de ce qu'a réalisé le groupe de Stanford. Ils ont commencé avec un type de théorie des cordes très étudié – un espace-temps quadridimensionnel plat avec une petite géométrie à six dimensions, attachée à chaque point. Ils ont choisi la géométrie de l'un des espaces de Calabi-Yau comme étant celle des six dimensions enroulées

(voir chapitre 8). En effet, puisqu'il existe au moins cent milles espaces de Calabi-Yau, on doit en choisir un représentant dont la géométrie sera caractérisée par plusieurs constantes.

Ensuite, ils ont enroulé de grandes quantités de flux électrique et magnétique autour des espaces à six dimensions, en chaque point. Puisqu'on ne peut enrouler que des unités discrètes de flux, cela tend à geler les instabilités. Pour stabiliser mieux encore la géométrie, il faut utiliser quelques effets quantiques, qui ne sont pas issus directement de la théorie des cordes, mais qui relèvent des théories de jauge supersymétriques et pourraient par conséquent jouer un rôle ici. En combinant ces effets quantiques avec les effets des flux, on obtient une géométrie où tous les modules sont stables.

On peut le faire de telle façon que la constante cosmologique dans l'espace-temps quadridimensionnel soit négative. Il s'avère que si on désire une constante cosmologique plus petite, on est obligé d'enrouler plus de flux ; l'enroulement de grand nombre de flux mène à une constante cosmologique minuscule, mais toujours négative. (Comme je l'ai déjà dit, on ne sait pas comment décrire explicitement la théorie des cordes, en détail, sur un fond comme celui-ci, mais il n'y a aucune raison de ne pas croire qu'il existe une façon de le faire.) Mais ce qui importe est d'obtenir une constante cosmologique *positive*, pour parvenir à un accord avec les nouvelles observations de l'accélération de l'expansion de l'univers. La prochaine étape est donc d'enrouler les autres branes sur la géométrie, d'une manière différente qui produise l'effet de croissance de la constante cosmologique. Exactement comme il existe des antiparticules, il existe aussi des antibranes, et ce sont elles que le groupe stanfordien a utilisées. En les enroulant, il est possible d'ajouter de l'énergie pour que la constante cosmologique devienne petite et positive. En même temps, la tendance des théories des cordes de se couler les unes dans les autres est supprimée, parce que tout changement requiert un pas discret. En conséquence, deux problèmes se trouvent résolus simultanément : les instabilités sont éliminées et la constante cosmologique est rendue petite et positive.

Il n'est pas à exclure que le groupe stanfordien ait sauvé la théorie des cordes, au moins pour l'instant, de la crise générée par la constante cosmologique. Mais la façon dont ils l'ont fait a produit des conséquences si bizarres et inattendues qu'elle a divisé la communauté des cordes en factions. Avant, la communauté était parfaitement en accord. Les colloques de la théorie des cordes dans les années 1990 ressemblaient à la Chine du début des années 1980, où toute personne à qui vous parliez avait l'air de tenir avec ferveur la même position. Pour le meilleur ou pour le pire, le groupe stanfordien a cassé l'unité de ce petit monde.

Rappelez-vous que la théorie des cordes particulière, dont il est question ici, provient de l'enroulement des flux autour des géométries compactes. Pour obtenir une petite constante cosmologique, vous n'avez qu'à enrouler beaucoup de flux. Mais il existe plus d'une façon d'enrouler ; en fait, il en existe beaucoup. Combien ?

Avant de répondre à cette question, je dois souligner que nous ne savons même pas s'il existe une théorie quantique des cordes cohérente construite par l'enroulement des flux autour des dimensions supplémentaires. Cette question est trop difficile pour qu'on puisse y répondre avec les méthodes qui sont à notre disposition. Nous sommes seulement capa-

bles d'appliquer des tests, qui fournissent des conditions *nécessaires mais pas suffisantes* pour que les bonnes théories des cordes existent. Les tests demandent que les théories des cordes, si elles existent, aient des cordes en interaction faible. Cela signifie que si l'on pouvait faire des calculs en théorie des cordes, les résultats seraient très proches des prédictions des calculs approchés que nous savons déjà faire.

Une question à laquelle on *sait* répondre est de savoir combien de théories des cordes passent ces tests, qui comprennent l'enroulement des flux autour des six dimensions cachées. La réponse dépend de la valeur de la constante cosmologique que l'on souhaite obtenir. Si l'on se contente d'une constante cosmologique négative ou nulle, alors il existe un *nombre infini de théories distinctes*. Si l'on désire une théorie à constante cosmologique positive, pour être en accord avec les observations, alors il n'en existe qu'un nombre fini ; à ce jour, nous avons des indications sur l'existence d'environ 10^{500} théories de ce type. C'est un nombre énorme de théories des cordes. De plus, chacune d'entre elles est différente des autres. Chacune donne des prédictions différentes pour la physique des particules élémentaires et également pour les valeurs des paramètres du modèle standard.

L'idée que la théorie des cordes nous fournit non pas une théorie, mais un paysage de théories constitué de plusieurs théories possibles, avait été avancée à la fin des années 1980 et au début des années 1990, mais elle fut rejetée par la majorité des théoriciens. Comme je l'ai déjà dit, Andrew Strominger avait découvert, en 1986, qu'il existait un grand nombre de théories des cordes toutes apparemment cohérentes, et quelques théoriciens des cordes s'étaient inquiétés de la perte du pouvoir prédictif qui en résultait ; mais la plupart étaient restés confiants, pensant qu'une condition apparaîtrait pour nous remettre sur le chemin de la seule théorie correcte. Cependant, le travail de Bousso et Polchinski et celui du groupe stanfordien a détruit cet espoir en montrant l'existence indispensable d'un grand nombre de théories des cordes pour la résolution de deux problèmes essentiels : rendre les théories des cordes cohérentes avec les observations de l'énergie du vide positive et les stabiliser. C'est probablement pour cette raison que le vaste paysage des théories a finalement été accepté non pas comme un résultat bizarre qu'il valait mieux ignorer, mais comme un moyen de sauver la théorie des cordes de la falsification.

Une autre raison qui explique pourquoi l'idée du paysage a gagné était que, tout simplement, les théoriciens se sont découragés. Ils ont passé beaucoup de temps à chercher le principe qui sélectionnerait une théorie des cordes unique, mais ils n'ont pu dégager aucun principe de ce genre. À la suite de la deuxième révolution des supercordes, la théorie était déjà beaucoup mieux comprise. En particulier, les dualités ont rendu plus difficile la possibilité d'argumenter sur le fait que la plupart des théories des cordes seraient instables. Ainsi, les théoriciens des cordes ont commencé à accepter ce vaste paysage de possibilités. La question qui motivait les recherches n'était plus celle de comment trouver la théorie unifiée, mais comment faire de la physique avec un ensemble de théories d'une telle taille.

Une réponse serait de dire que c'est impossible. Même si on se limite aux théories qui sont en accord avec l'observation, il y en a tant que, avec une quasi-certitude, en sélectionnant l'une ou l'autre, on trouvera tous les résultats que l'on voudra. Pourquoi ne pas prendre cette situation pour un *reductio ad absurdum* ? Cette phrase en latin a l'air bien

sérieuse, mais en français elle signifie que si la tentative de construire l'unique théorie de la nature mène à 10^{500} théories, alors cette approche n'est qu'une absurdité.

Ceci pose beaucoup de problèmes à ceux qui se sont investis dans l'étude de la théorie des cordes pendant des années et même des décennies. Si déjà c'est pénible pour moi, qui lui ai consacré un certain temps et quelques efforts, je ne peux qu'imaginer comment quelques-uns de mes amis doivent se sentir, ceux particulièrement qui ont mis toutes leurs carrières en jeu. Mais même si cela est très douloureux, admettre la *reductio ad absurdum* est une réponse honnête et rationnelle au vu de la situation. C'est la réponse choisie par quelques physiciens de ma connaissance. Ce n'est pas celle de la majorité des théoriciens des cordes.

Il existe une autre réponse rationnelle : nier qu'un grand nombre de théories existent. Les arguments en faveur des nouvelles théories à constante cosmologique positive sont fondés sur des approximations drastiques ; peut-être ce genre d'argument force-t-il les théoriciens à croire en des théories qui n'existent pas sur le plan mathématique, sans même mentionner le plan physique.

En effet, les preuves d'existence d'un grand nombre de théories des cordes avec la constante cosmologique positive ne sont fondées que sur des arguments très indirects. On ne sait pas comment décrire réellement les cordes qui se déplacent sur ce genre de fond spatio-temporel. Qui plus est, si l'on peut définir quelques conditions nécessaires pour qu'une théorie des cordes existe, on ne sait pas, en revanche, si ces conditions sont aussi *suffisantes* pour l'existence de la théorie. Par conséquent, il n'y a pas de preuve que la théorie des cordes existe réellement sur au moins un de ces fonds. Une personne rationnelle peut donc dire qu'elle n'existe peut-être pas. En effet, il y a des résultats récents – de Gary Horowitz, qui est un des découvreurs des espaces de Calabi-Yau, et deux jeunes collègues, Thomas Hertog et Kengo Maeda –, qui posent des questions sur la capacité d'*au moins une* de ces théories à décrire des mondes stables[27]. Soit on peut prendre ce genre d'indications au sérieux, soit on peut les ignorer – et c'est cela que choisissent la majorité des théoriciens des cordes. Une instabilité potentielle, découverte par Horowitz et ses collaborateurs, affecte non seulement le paysage des théories nouvelles révélées par le groupe stanfordien, mais aussi toutes les solutions qui impliquent les espaces de Calabi-Yau en six dimensions. Si ces solutions sont vraiment toutes instables, cela veut dire qu'on devra jeter à la poubelle une grande partie du travail qui a visé à l'établissement d'un lien entre la théorie des cordes et le monde réel. Aussi, il existe actuellement un débat sur la validité de certains des présupposés faits par le groupe stanfordien.

Au début de la première révolution des supercordes, on a trouvé miraculeux qu'une théorie des cordes pût seulement exister. Qu'il y en ait eu cinq était encore plus surprenant. L'improbabilité absolue de tout ceci cimenta notre croyance dans le projet. S'il était initialement douteux qu'il réussisse et qu'il ait fini par réussir tout de même, cela n'aurait été rien d'autre qu'une merveille ! Aujourd'hui, les théoriciens des cordes sont prêts à accepter l'existence du paysage contenant un grand nombre de théories en fondant leur jugement sur beaucoup moins de preuves que ce qu'il a fallu, il y a vingt ans, pour se convaincre de l'existence d'au moins une seule théorie des cordes.

Il faut poser une limite et dire : « J'ai besoin d'être persuadé que ces théories existent selon les mêmes critères utilisés, il y a quelques dizaines d'années, pour évaluer les cinq théories initiales. » Si l'on insiste sur le même niveau d'évaluation, on ne croira alors pas au grand nombre de théories nouvelles, parce que, selon ces vieux critères, les preuves d'existence d'au moins une des théories appartenant au paysage sont loin d'être suffisantes. C'est mon point de vue la plupart du temps. Cette opinion me semble être en effet la manière la plus rationnelle de lire les indications obtenues jusqu'à ce jour.

11
La solution anthropique

Beaucoup de physiciens de ma connaissance n'espèrent plus que la théorie des cordes soit une théorie fondamentale de la nature. Depuis quelque temps, il est devenu à la mode de dire que le problème concernait non pas la théorie des cordes, mais les critères déterminant ce qu'est une théorie physique. Cet argument a été introduit, il y a quelques années, par Leonard Susskind dans un article intitulé « Le paysage anthropique de la théorie des cordes » :

> À partir de travaux récents d'un certain nombre d'auteurs, il paraît probable que le paysage est si vaste et diversifié qu'on ne peut même pas en avoir un aperçu. Que cela nous plaise ou non, ce type de comportement justifie le principe anthropique... Les [théories dans le paysage étudié par le groupe stanfordien] ne sont pas simples du tout. Elles sont toutes des casse-tête, des machins de Rube Goldberg, qui ne pourraient posséder qu'avec peine une signification fondamentale. Mais, en théorie anthropique, la simplicité et l'élégance ne sont pas des considérations valables. Le seul critère pour choisir un état du vide est son utilité, s'il possède ou non les éléments nécessaires à la vie, à la formation des galaxies et à la chimie complexe. Ceci – avec la cosmologie qui garantie une haute probabilité qu'au moins un morceau assez grand de l'espace soit formé avec cette structure du vide –, c'est tout ce dont nous avons besoins[28].

Le principe anthropique auquel se réfère Susskind est une vieille idée introduite et explorée par les cosmologues depuis les années 1970, selon laquelle la vie ne peut apparaître que dans une gamme très étroite des paramètres physiques possibles ; pourtant, malgré cette étroitesse, assez bizarrement, nous voilà comme si l'univers avait été intentionnellement créé pour nous accueillir (d'où le terme « anthropique »). La version particulière qu'invoque Susskind est un scénario cosmologique, qui a été soutenu pendant un certain temps par Andrei Lindé, appelé « inflation éternelle ». Selon ce scénario, la phase d'inflation rapide à la naissance de l'univers aurait produit non pas un, mais une population infinie d'univers. On peut s'imaginer l'état primordial de l'univers comme une phase en expansion exponentielle permanente, qui ne s'arrêterait jamais. Des bulles y apparaissent, et à ces endroits l'expansion se ralentit de façon spectaculaire. Notre monde serait une de ces bulles, et il en existerait d'autres, en nombre infini. À ce scénario, Susskind a ajouté l'idée que chaque formation d'une bulle sélectionnerait une théorie des cordes, se-

lon un processus naturel gouvernant cet univers. Il en résulterait une vaste population d'univers, chacun régi par une théorie des cordes sélectionnée aléatoirement dans le paysage des théories. Quelque part dans cette chose qu'on appelle « multivers », se trouve chacune des théories possibles appartenant au paysage.

Il me semble tout à fait regrettable que Susskind et d'autres aient adhéré au principe anthropique, car il s'agit d'une base très pauvre pour fonder une démarche scientifique, ce que nous avons compris il y a un certain temps déjà. Puisque toute théorie possible gouverne une région du multivers, on ne peut qu'en tirer très peu de prédictions. Il est facile de comprendre pourquoi.

Pour faire une prédiction dans une théorie qui postule une vaste population d'univers qui satisfont à des lois sélectionnées au hasard, on devrait d'abord décrire tout ce que l'on sait à propos de notre propre univers, celui où nous vivons. Ces éléments s'appliqueront ensuite aussi à un certain nombre d'univers autres que le nôtre ; on se réfère à ce sous-ensemble des univers en tant qu'*univers potentiellement vrais*.

Tout ce que l'on sait est que notre univers fait partie des univers potentiellement vrais. Étant donné le présupposé que la population des univers a été engendrée par une distribution aléatoire des lois fondamentales de la nature, on ne peut savoir que peu de chose mis à part ce premier constat de notre appartenance aux univers vrais. On ne pourra faire une nouvelle prédiction qu'à condition que tout ou presque tout univers potentiellement vrai ait une propriété qui ne soit pas déjà observée dans notre propre univers.

Par exemple, supposez que dans presque tout univers potentiellement vrai, l'oscillation résonante à l'extrémité inférieure du spectre soit le do du bas de la gamme. Dans ce cas, il est très probable qu'un univers choisi au hasard parmi les univers potentiellement vrais soit en résonance en do bas. Comme on ne peut rien savoir de notre propre univers hormis qu'il est potentiellement vrai, on peut aussi prédire avec une probabilité élevée que notre univers est en train de chanter en do bas.

Puisqu'on suppose que la distribution des propriétés parmi tous les univers est aléatoire, le problème est qu'on ne trouve que très peu de propriétés comme celle du do bas. Plus vraisemblablement, dès que sont spécifiées les propriétés que nous observons dans notre propre univers, les propriétés qui restent, et que possède tout univers, doivent être distribuées au hasard parmi les autres univers potentiellement vrais. Par conséquent, on ne peut pas faire de prédiction.

Ce que je viens de décrire est ce que certains cosmologues appellent le « principe anthropique faible ». Comme son nom l'indique, la seule chose dont on soit sûr à propos de notre univers est qu'il permet l'existence de la vie intelligente ; par conséquent, tout univers potentiellement vrai doit être un lieu où la vie intelligente pourrait exister. Selon Susskind et les autres, ce principe n'apporte rien de nouveau. Par exemple, comment expliquer que la gamme de températures de notre planète permette à l'eau d'être à l'état liquide ? S'il n'existait qu'une seule planète dans l'univers, ce serait assez étonnant. On pourrait alors croire à la nécessité d'un dessein intelligent et de celui qui le réalise. Mais puisque nous savons qu'il existe un grand nombre d'étoiles et de planètes, nous compre-

nons qu'il en existe beaucoup qui permettent à la vie d'exister, par le seul fait du nombre, et qu'il n'est donc guère étonnant que nous nous trouvions sur l'une d'elles.

Pourtant, il y a une différence énorme entre l'analogie avec les planètes et la situation cosmologique, qui consiste à ne connaître aucun univers sauf le nôtre. L'existence de la population d'autres univers est une hypothèse que l'on ne peut pas vérifier par l'observation directe ; par conséquent, on ne peut pas l'utiliser à une fin d'explication quelconque. Il est vrai que s'il existait une population des univers avec des lois aléatoires, nous ne serions pas surpris de nous trouver dans un univers où les conditions sont réunies pour que nous puissions y vivre. Mais le fait que nous sommes, en réalité, dans un univers favorable à la vie ne peut pas être pris pour confirmation d'une théorie visant à dire qu'il existe une grande population d'univers.

Il existe un contre-argument qu'on peut illustrer à l'aide de l'exemple des planètes autres que la nôtre. Supposons qu'il soit impossible d'observer les autres planètes. Si l'on avait déduit de ce présupposé qu'en réalité il n'existait qu'une seule planète, on devrait alors croire en quelque chose de très improbable, à savoir, que la seule planète qui existe est propice à la vie. De l'autre côté, si l'on suppose qu'il existe beaucoup de planètes avec des propriétés différentes, même s'il est impossible de les observer, alors la probabilité que quelques-unes soient favorables à la vie s'approchera de 1. Par conséquent, nous dit-on, il est beaucoup plus probable qu'il existe beaucoup de planètes, plutôt qu'il n'en existe qu'une seule.

Mais cet argument apparemment fort contient une erreur[*]. Pour comprendre pourquoi, comparons-le avec un autre argument formulé avec les mêmes faits expérimentaux. Quelqu'un qui croit en un dessein intelligent pourrait dire que s'il n'existe qu'une seule planète et si celle-ci est propice à la vie, alors la probabilité qu'un créateur intelligent soit intervenu est élevée. Étant donné le choix entre deux théories : (1) la planète unique est propice à la vie à cause d'une chance extraordinaire, et (2) il y a eu un créateur intelligent qui a fait la planète unique et l'a rendue propice à la vie – la même logique nous amène à la conclusion que la seconde option est beaucoup plus rationnelle que la première.

Le scénario avec plusieurs univers non observés répond à la même logique que celui où apparaît le créateur intelligent. Chacun des deux fournit une hypothèse impossible à tester, qui, si elle est vraie, rendrait assez probable quelque chose qui est, pour l'instant, très improbable.

Ces arguments sont fallacieux car ils reposent sur un présupposé implicite : que l'on travaille avec une liste exhaustive d'options. Pour revenir à l'analogie des planètes, il n'est pas exclu qu'une explication naturelle du caractère propice à la vie de notre planète émerge dans l'avenir. L'erreur, dans les deux arguments, est qu'ils comparent une seule explication possible, mais non vérifiable, avec l'affirmation qu'il n'y a pas d'explication possible. Cer-

[*] Le principe erroné qui est utilisé dans l'argument est le suivant. Observons *O* et considérons deux explications possibles. Étant donné l'explication *A*, la probabilité de *O* est très basse, mais étant donné l'explication *B*, la probabilité de *O* est élevée. Il est tentant d'en déduire que la probabilité est beaucoup plus élevée pour *B* que pour *A*, mais il n'existe aucun principe logique ni aucun principe de la théorie des probabilités qui aurait validé une déduction pareille.

tes, si on ne nous donne que ces deux choix, l'explication paraît alors plus rationnelle que toute improbabilité non expliquée.

Pendant des siècles, nous avons eu de bonnes raisons de croire qu'il existait beaucoup de planètes puisqu'il existe beaucoup d'étoiles – et, récemment, l'observation directe a confirmé la présence de planètes extrasolaires. Par conséquent, nous pensons désormais que le grand nombre de planètes explique qu'il en existe certaines, dont la nôtre, qui soient favorables à la vie. Pour ce qui concerne les univers, nous avons au moins trois possibilités :

1. Notre univers est un parmi un grand nombre d'univers avec des lois aléatoires.
2. Il y a eu un créateur intelligent.
3. Il existe un mécanisme encore inconnu, qui doit expliquer le caractère propice à la vie de notre univers, et qui fournira des prédictions testables dont on se servira pour le vérifier ou le falsifier.

Étant donné que les deux premières possibilités sont en principe non testables, il est plus rationnel de choisir la troisième. En effet, c'est la seule des trois que nous, scientifiques, devons considérer, car accepter une des deux autres reviendrait à annoncer la fin prochaine de notre discipline.

Certains physiciens disent que le principe anthropique faible doit être pris au sérieux, car dans le passé il a produit de véritables prédictions. Je parle ici de quelques collègues pour qui j'ai la plus grande admiration : par seulement Susskind, mais aussi Steven Weinberg, le physicien qui, avec Abdus Salam, a unifié les forces électromagnétiques avec celle des interactions nucléaires faibles (*cf.* chapitre 4). Il est alors d'autant plus pénible pour moi de constater que dans tous les cas que j'ai étudiés, ces arguments étaient fallacieux.

Considérez par exemple l'argument suivant, à propos des propriétés des noyaux de carbone, fondé sur les recherches menées autour de 1950 par le grand astrophysicien britannique Fred Hoyle. L'argument commence ainsi : pour que la vie puisse exister, il faut du carbone. En effet, il en existe plein. On sait que le carbone ne peut pas avoir été créé durant le Big Bang ; par conséquent, il a dû être créé dans les étoiles. Hoyle a remarqué que le carbone ne pouvait être produit dans les étoiles qu'à condition qu'il y ait dans les noyaux de carbone un état résonnant. Il a ensuite évoqué cette prédiction devant un groupe d'expérimentateurs, qui ont effectivement découvert cet état.

La réussite de la prédiction de Hoyle est parfois évoquée pour soutenir l'efficacité du principe anthropique. Mais l'argument fondé sur l'existence de la vie, exposé dans le paragraphe précédent, n'a pas de relation logique avec le reste de l'argumentation de ce paragraphe. Ce qu'a accompli Hoyle n'a été que de raisonner à partir de l'observation que l'univers est rempli de carbone, d'où il a tiré une conclusion fondée sur la nécessité d'un processus qui produirait tout ce carbone. Le fait que nous-mêmes et les autres créatures vivantes soient faites de carbone n'est pas nécessaire dans cet argument.

Un autre exemple qu'on cite souvent en faveur du principe anthropique est une prédiction concernant la constante cosmologique, qui a été énoncée dans un article célèbre de Steven Weinberg, en 1987. Dans cet article, Weinberg affirmait que la constante cosmo-

logique devait être inférieure à une certaine valeur, puisque, dans le cas contraire, l'univers aurait été en expansion trop rapide pour que les galaxies puissent être formées[29]. Puisqu'on observe que l'univers est plein de galaxies, la constante cosmologique doit être limitée. Et elle l'est, tout comme elle doit l'être. C'est de la science correcte et parfaitement juste. Mais, avec cet argument scientifique valide, Weinberg est allé beaucoup plus loin. Supposons qu'il y ait le multivers, a-t-il dit, et supposons que les valeurs de la constante cosmologique soient distribuées au hasard entre les univers dans ce multivers. Dans ce cas-là, parmi tous les univers potentiellement vrais, la valeur type de la constante cosmologique serait de l'ordre de grandeur de celle qui est la plus élevée mais qui reste encore cohérente avec la formation des galaxies. Par conséquent, si le scénario du multivers est correct, on doit s'attendre à ce que la constante cosmologique soit aussi élevée qu'elle puisse l'être, tout en permettant la formation des galaxies.

Lorsque Steven Weinberg a publié cette prédiction, on croyait généralement que la constante cosmologique était égale à zéro. Ainsi, quelques années plus tard, cela fit grande impression que sa prédiction se révèle correcte, à un facteur 10 près. Pourtant, lorsque de nouveaux résultats nous ont permis d'examiner plus en détail les affirmations de Weinberg, des problèmes apparurent. En fait, Weinberg considérait une population d'univers où seule la constante cosmologique était distribuée aléatoirement, les autres paramètres étant fixes. Au lieu de procéder ainsi, il aurait dû prendre les moyennes de tous les membres du multivers, dont la structure permet la formation des galaxies, tout en laissant varier *tous* les paramètres. Si on reprend son argument en tenant compte de cette remarque, la prédiction de la valeur de la constante cosmologique est beaucoup moins proche de la valeur observée.

Cela nous permet d'illustrer le problème classique de ce genre de raisonnement. Si votre scénario invoque des paramètres distribués au hasard dont vous ne pouvez observer qu'un sous-ensemble, vous serez alors capables d'obtenir une large gamme de prédictions, toutes possibles, en fonction des présupposés précis que vous aurez faits au sujet de la population inconnue et inobservable des autres sous-ensembles. Par exemple, chacun d'entre nous appartient à plusieurs communautés. Dans beaucoup de ces communautés, nous sommes des membres types, mais dans d'autres, nous sommes atypiques. Supposez que dans ma courte biographie sur la couverture de ce livre, j'écrive seulement que je suis une personne typique. Combien d'information me concernant seriez-vous capable d'en déduire ?

Il existe beaucoup d'autres cas où on pourrait tester d'autres versions du principe anthropique faible. Dans le cadre du modèle standard de la physique des particules élémentaires, il existe des constantes qui n'ont simplement pas la valeur à laquelle on s'attendrait si elles étaient choisies au moyen d'une distribution aléatoire parmi les univers potentiellement vrais. On aurait dû s'attendre à ce que les masses des quarks et des leptons, sauf pour la première génération, soient distribuées au hasard ; or, on trouve des relations entre elles. On aurait dû s'attendre à ce que certaines symétries des particules élémentaires soient brisées par les interactions nucléaires fortes d'une façon beaucoup plus importante que ce qu'il se passe en réalité. On aurait dû s'attendre à ce que le proton se décompose beaucoup plus rapidement que ce que nous constatons dans les expériences en cours. En fait, je ne

connais aucune prédiction réussie faite d'après un raisonnement fondé sur le multivers avec la distribution aléatoire des lois.

Mais que se passe-t-il avec la troisième possibilité, à savoir l'explication du caractère propice à la vie de notre univers fondée sur des hypothèses testables ? En 1992, j'ai avancé une hypothèse appartenant exactement à ce groupe. Pour obtenir des prédictions vérifiables à partir de la théorie du multivers, la population des univers doit être loin d'une population aléatoire. En fait, elle doit avoir une structure fine, de telle sorte que tous ou la majorité des univers aient des propriétés qui n'auraient rien à voir avec notre existence. Si c'était le cas, on pourrait alors prédire que notre univers possède les propriétés en question.

Une façon d'obtenir ce type de théorie consiste à imiter la manière dont fonctionne la sélection naturelle en biologie. J'ai inventé ce scénario à la fin des années 1980, quand il est devenu clair qu'il existait un grand nombre de versions de la théorie des cordes. En lisant les livres des biologistes évolutionnistes comme Richard Dawkins et Lynn Margulis, j'ai compris qu'en biologie, il existe des modèles de l'évolution fondés sur l'espace des phénotypes possibles et qu'ils appelaient « paysages de fitness ». J'ai adopté cette idée et ce terme, et j'ai inventé un scénario selon lequel les univers sont nés à l'intérieur des trous noirs. Dans le livre *La Vie du cosmos* (1997), j'ai profondément réfléchi aux implications de cette idée ; c'est pourquoi je n'entre pas dans le détail ici, sauf pour dire que la théorie, que j'ai appelée « sélection cosmologique naturelle », a produit des prédictions véritables. En 1992, j'en ai publié deux, et elles n'ont pas été invalidées depuis lors, bien que de nombreuses observations postérieures auraient pu les falsifier. Elles sont : (1) qu'il ne doit pas y avoir d'étoiles à neutrons plus massives que 1,6 fois la masse du soleil, et (2) que le spectre des fluctuations engendrées par l'inflation – observé sur le fond diffus cosmologique – doit être cohérent avec la version de l'inflation la plus simple parmi les possibles, qui contient un paramètre et un seul champ d'inflaton[30].

Susskind, Lindé et d'autres ont attaqué l'idée de la sélection cosmologique naturelle, parce qu'ils tenaient et tiennent toujours à ce que le nombre d'univers créés dans l'inflation éternelle dépasse de loin celui des univers créés à travers les trous noirs. Pour faire face à cette objection, il est important de savoir dans quelle mesure on peut faire confiance à la prédiction de l'inflation éternelle. On dit parfois qu'il est difficile d'envisager l'inflation tout court sans l'inflation éternelle et le fait que certaines prédictions de la cosmologie inflationniste aient été confirmées est donc utilisé comme une preuve de l'inflation éternelle. Pourtant, sauter le pas entre inflation tout court et inflation éternelle présuppose qu'il n'y aura pas d'obstacle à étendre ainsi des conclusions valables pour notre échelle cosmologique actuelle à des échelles largement supérieures. Il existe deux problèmes à cette extension. Premièrement, l'extrapolation à des échelles plus grandes pour le temps présent implique, dans certains modèles d'inflation, d'extrapoler à des échelles beaucoup plus petites pour la naissance de l'univers. (Je n'expliquerai pas ici ce point, mais il est vrai pour quelques modèles inflationnistes.) Cela signifie que pour obtenir un univers beaucoup plus gonflé que notre univers actuel, on doit étendre la description du début de l'univers à des échelles de temps beaucoup plus petites que le temps de

Planck, avant lequel les effets de la gravité quantique dominaient l'évolution de l'univers. C'est problématique, puisque la description habituelle de l'inflation présuppose un espace-temps classique et l'absence d'effets de la gravité quantique ; de plus, plusieurs théories de la gravité quantique prédisent qu'un intervalle de temps plus court que le temps de Planck n'existe pas. Deuxièmement, des indications existent selon lesquelles les prédictions de l'inflation ne sont pas satisfaites aux échelles les plus vastes actuellement observables (voir chapitre 13). Par conséquent, l'extrapolation allant de l'inflation tout court à l'inflation éternelle n'est pas valable, ni sur le plan théorique, ni sur celui des observations. Cela ne paraît donc pas être une objection forte à la sélection cosmologique naturelle.

Bien que le principe anthropique n'ait pas produit de prédictions véritables et ne semble pas pouvoir en produire prochainement, Susskind, Weinberg et d'autres théoriciens de premier plan l'ont considéré comme une révolution non seulement en physique, mais également dans notre conception de ce qu'est une théorie physique. Dans un essai récent, Weinberg a écrit :

> La plupart des percées dans l'histoire de la physique théorique ont été des découvertes à propos de la nature, mais, lors de certains tournants, nous avons fait des découvertes à propos de la science elle-même... Aujourd'hui, il se peut que nous nous trouvions à un nouveau tournant, correspondant au changement radical de ce que nous acceptons en tant que fondement légitime d'une théorie physique... Plus élevé est le nombre de valeurs possibles de paramètres physiques fournies par le paysage des cordes, plus la théorie des cordes rend légitime le raisonnement anthropique comme le nouveau fondement des théories physiques : tout scientifique qui étudie la nature doit vivre dans une partie du paysage où les paramètres physiques ont les valeurs permettant l'apparition de la vie et des scientifiques[31].

Steven Weinberg est reconnu à juste titre pour ses contributions au modèle standard ; ses écrits sont d'habitude empreints d'une rationalité sobre et presque irrésistible. Mais, pour le dire simplement, en raisonnant ainsi, on perd la capacité de soumettre la théorie aux tests qui, comme l'a montré à plusieurs reprises l'histoire des sciences, sont nécessaires pour séparer les bonnes théories des théories belles mais fausses. Une théorie doit fournir des prédictions spécifiques et précises que l'on pourra par la suite confirmer ou réfuter. Si elle court un risque élevé de falsification, alors sa vérification a beaucoup d'importance. Mais si on ne prend pas le risque de falsification et de vérification, alors on ne peut plus continuer à faire de la science.

J'ai l'impression que dans le débat sur la façon dont la science doit considérer le vaste paysage des cordes, on ne peut suivre que trois chemins :

1. La théorie des cordes est vraie et le multivers aléatoire est vrai. Pour leur laisser place, on doit changer les règles qui régissent la manière dont la science fonctionne, parce que, selon l'éthique scientifique habituelle, on ne peut pas se permettre de croire en une théorie qui ne produit pas de prédictions sans équivoque, grâce auxquelles elle pourrait être vérifiée ou falsifiée.
2. On trouvera finalement une autre manière de progresser, qui permettra de tirer des conclusions prédictives uniques et testables à partir de la théorie des cordes. Cela peut se

faire soit en montrant que la théorie est réellement unique, soit en adhérant à une autre théorie du multivers, non aléatoire, qui mènera à des prédictions nouvelles et vérifiables.

3. La théorie des cordes n'est pas *la* théorie de la nature. Celle-ci est mieux décrite par une autre théorie, qui est encore à découvrir et à accepter, qui produira, elle, des prédictions véritables et, éventuellement, les expériences les confirmeront.

Il me paraît remarquable qu'un certain nombre d'éminents scientifiques ne semblent pas prêts à accepter la possibilité que la théorie des cordes ou l'hypothèse du multivers aléatoire soient fausses. Voici quelques commentaires révélateurs :

> « Le raisonnement anthropique va tellement à l'encontre des buts historiques de la physique théorique que je lui ai résisté longtemps après avoir compris qu'il était très probablement nécessaire. Mais maintenant j'ai fait mon *coming-out*. » (Joseph Polchinski)
>
> « Ceux qui n'aiment pas le principe anthropique nient simplement l'évidence. » (Andrei Lindé)
>
> « L'existence possible d'un énorme paysage est un développement fascinant en physique théorique, qui force à reconsidérer radicalement plusieurs de nos présupposés. Viscéralement, j'ai la sensation que cela est vrai. » (Nima Arkani-Hamed, université de Harvard)
>
> « Je pense qu'il est assez plausible que le paysage soit réel. » (Max Tegmark, MIT)

Même Edward Witten a l'air perplexe : « Je n'ai simplement rien de pertinent à dire à ce sujet. J'espère que nous en apprendrons plus par la suite[32]. »

Tous ceux qui je viens de citer sont des scientifiques pour lesquels j'ai la plus grande admiration. Néanmoins, il me semble que toute personne impartiale qui ne s'est pas irrationnellement engagée dans la théorie des cordes pourrait comprendre clairement la situation. Une théorie n'a pas pu fournir de prédictions avec lesquelles on aurait pu la tester et quelques-uns de ses partisans, au lieu d'admettre l'échec, demandent à changer les règles du jeu afin que leur théorie n'ait plus besoin de passer tous les tests qu'on impose habituellement aux nouvelles théories scientifiques.

Il paraît rationnel de refuser une telle demande et d'insister sur le fait qu'on ne doit pas modifier les règles de la science uniquement pour sauver une théorie qui n'a pas comblé les attentes. Si la théorie des cordes ne fait pas de prédictions uniques pour l'expérience et si elle n'explique rien à propos du modèle standard de la physique des particules, et surtout de ce qui à son sujet était auparavant mystérieux – mis à part l'affirmation évidente que nous devons vivre dans un univers où nous pouvons vivre –, alors il semble que la théorie, après tout, n'est pas bonne. L'histoire des sciences nous fournit beaucoup d'exemples d'échecs de théories considérées à leur début comme très prometteuses. Pourquoi ne serait-ce pas le cas ?

Malheureusement, nous sommes arrivés à la conclusion que la théorie des cordes n'a produit aucune prédiction nouvelle, précise et falsifiable. Or ses présupposés à propos du monde sont très audacieux. Une expérience ou une observation pourraient-elles un jour

révéler des preuves qui valideraient une de ces caractéristiques nouvelles et surprenantes ? Même s'il n'y pas de prédiction définitive qu'une flèche dans un appareil de mesure pointe vers le haut ou vers le bas – c'est-à-dire des prédictions qui pourraient tuer ou valider la théorie – est-il encore possible que nous trouvions les preuves d'une caractéristique essentielle pour la conception d'une nature à cordes ?

La nouveauté la plus évidente de la théorie des cordes, ce sont les cordes elles-mêmes. Si nous pouvions sonder l'échelle des cordes, il n'y aurait plus aucun problème pour recueillir en abondance les preuves de la théorie, à condition que celle-ci soit vraie. On verrait aussi des indications sur le fait que les objets fondamentaux sont plutôt unidimensionnels que ponctuels. Mais les accélérateurs ne savent pas réaliser d'expériences à des énergies proches, même de loin, de celles des cordes. Existe-t-il un autre chemin par lequel les cordes pourraient se révéler ? Peut-on les inciter à augmenter en taille pour qu'on puisse les voir lorsqu'elles seront assez grandes ?

Un tel scénario vient d'être proposé par Edmund Copeland, Robert Myers et Joseph Polchinski. Sous la condition de quelques présupposés très particuliers concernant la cosmologie, il pourrait être vrai que certaines cordes très longues aient été créées au début de l'univers et continuent d'exister[33]. L'expansion de l'univers les aurait étirées à tel point qu'elles auraient maintenant des millions d'années-lumière de longueur.

Ce phénomène ne se limite pas à la théorie des cordes. Pendant un certain temps, une théorie à la mode concernant la formation des galaxies suggérait qu'elles furent ensemencées par la présence d'énormes cordes de flux électromagnétique, rescapées du Big Bang. Ces *cordes cosmiques*, comme on les appelait, n'avaient rien à voir avec la théorie des cordes ; elles n'étaient qu'une conséquence de la structure des théories de jauge. Elles sont analogues aux lignes quantifiées du flux magnétique dans les supraconducteurs, et il est possible qu'elles aient été formées au début de l'univers comme une conséquence de son passage par des phases de transition, au fur et à mesure de son refroidissement. On a maintenant des preuves définitives provenant des observations cosmologiques que ces cordes n'étaient pas un ingrédient principal dans la formation de la structure de l'univers, mais il n'est cependant pas impossible que quelques-unes de ces cordes soient là depuis le Big Bang. Les astronomes les cherchent en essayant de détecter leurs effets sur la lumière des galaxies lointaines. S'il y avait une corde cosmique entre notre ligne de visée et une galaxie éloignée, alors le champ gravitationnel de la corde agirait comme une lentille, dédoublant l'image de la galaxie d'une façon bien particulière. D'autres objets, comme la matière noire ou une autre galaxie, pourraient produire un effet semblable, mais aujourd'hui les astronomes peuvent faire la distinction entre les images produites par ces choses et celles générées par une corde cosmique. Selon un rapport publié récemment, il semblerait qu'une telle lentille ait été détectée. Avec optimisme, elle fut dénommée CSL-1 ; mais après qu'on l'eut observée avec le télescope spatial Hubble, elle s'avéra n'être rien d'autre que deux galaxies proches l'une de l'autre[34].

Copeland et ses collègues ont découvert que, dans certaines conditions bien particulières, une corde fondamentale, étirée sur une longueur énorme par l'expansion de l'univers, pourrait ressembler à une corde cosmique. Par conséquent, elle pourrait être observable à

travers cet effet de lentille. Une telle corde cosmique fondamentale pourrait aussi être un générateur prodigieux d'ondes gravitationnelles, ce qui pourrait, à son tour, la rendre observable par LIGO, l'Observatoire des ondes gravitationnelles à interférométrie laser.

Des prédictions de ce genre nous ont redonné espoir que la théorie des cordes puisse être un jour vérifiée expérimentalement. Mais la découverte d'une corde cosmique ne peut pas valider à elle seule la théorie des cordes, car quelques autres théories prédisent, elles aussi, l'existence de telles cordes. Le fait de ne pas en trouver une ne peut pas, non plus, mener à la falsification de la théorie, parce que les conditions d'existence de ces cordes cosmiques sont si particulières qu'il n'y a aucune raison de penser qu'elles sont réalisées dans notre univers.

Outre l'existence des cordes, on trouve trois autres traits génériques du monde à cordes. Toutes les théories des cordes sensées sont d'accord pour dire qu'il doit y avoir des dimensions supplémentaires, que toutes les forces doivent être unifiées en une seule force, et que la supersymétrie existe. Ainsi, même si l'on n'a pas fait de prédictions détaillées, on peut voir si l'expérimentation valide ces hypothèses. Puisque celles-ci sont indépendantes de la théorie des cordes, si l'on trouve des preuves pour l'une d'entre elles, cela ne voudra pas dire que la théorie des cordes est vraie. Mais en revanche, si l'on prouve qu'il n'existe pas de supersymétrie, ou de dimensions supérieures, ou d'unification de toutes les forces, alors la théorie des cordes sera falsifiée.

Commençons par les dimensions supérieures. Il est probable que nous ne soyons pas capables de les voir, mais on peut sans doute traquer leurs effets, en cherchant par exemple les forces supplémentaires prédites par toutes les théories à dimensions supérieures. Ces forces sont portées par les champs qui constituent la géométrie des dimensions supplémentaires. De tels champs doivent exister, car on ne peut pas obliger les dimensions supplémentaires à produire uniquement les forces et les champs déjà observés à ce jour.

On s'attend à ce que les forces qui proviennent de ces champs soient à peu près aussi fortes que la gravitation, mais elles peuvent s'en différencier de plusieurs façons : elles pourraient avoir une portée finie, ou bien elles pourraient ne pas interagir de la même manière avec toutes les formes d'énergie. Quelques expériences en cours sont extraordinairement sensibles à ces forces hypothétiques. Il y a environ dix ans, une expérience a donné des indications préliminaires qu'une de ces forces pourrait exister ; on l'a appelée « la cinquième force ». Des expériences ultérieures n'ont pas confirmé le résultat initial, et à ce jour on n'a aucune preuve de l'existence de ces forces.

Les théoriciens des cordes ont généralement supposé que les dimensions supplémentaires étaient minuscules, mais quelques physiciens audacieux ont compris, dans les années 1990, que cela n'était pas nécessaire – les dimensions supplémentaires pourraient aussi être larges ou même infinies. C'est une possibilité ouverte par le scénario des mondes à branes. Selon une telle configuration, notre espace tridimensionnel serait en fait une brane – c'est-à-dire, quelque chose comme une membrane physique, mais en trois dimensions – suspendue dans le monde à quatre dimensions spatiales, ou plus. Les particules et les forces du modèle standard – les électrons, les quarks, les photons et les forces avec lesquelles elles interagissent – seraient restreintes à la brane tridimensionnelle qui constitue notre

monde. Par conséquent, en n'utilisant que ces forces on ne peut pas avoir de preuves de l'existence de dimensions supérieures. La seule exception est la force gravitationnelle. Étant universelle, la gravitation s'étend à toutes les dimensions de l'espace.

Ce genre de scénario fut élaboré en détail, pour la première fois, par trois physiciens du SLAC, le Centre stanfordien pour l'accélérateur linéaire : Nima Arkani-Hamed, Gia Dvali et Savas Dimopoulos. À la surprise générale, ils ont trouvé que les dimensions supplémentaires pourraient être assez grandes sans que cela entre en conflit avec les expériences connues. S'il y avait deux dimensions supplémentaires, celles-ci pourraient être aussi larges qu'un millimètre de diamètre[35].

L'effet principal de l'addition de telles dimensions supplémentaires larges est que, dans le monde à quatre ou cinq dimensions, la force gravitationnelle est beaucoup plus élevée que celle qu'on trouve sur la brane tridimensionnelle ; par conséquent, les effets de la gravité quantique se produiraient à une échelle spatiale beaucoup plus grande qu'on l'avait cru dans les autres cas. En théorie quantique, « échelle spatiale plus grande » signifie « énergie plus petite ». En rendant les dimensions supplémentaires aussi grandes qu'un millimètre de diamètre, on peut abaisser de 10^{19} GeV (l'énergie de Planck) à 10^{3} GeV l'échelle énergétique requise pour percevoir les effets quantiques. Cela permettrait de résoudre une des questions les plus difficiles concernant les paramètres du modèle standard : pourquoi l'énergie de Planck est aussi démesurément plus grande que la masse du proton ? Ce qui est vraiment passionnant est que cela ramènerait les effets de la gravité quantique à l'échelle que peut atteindre le LHC (*Large Hadron Collider*), qui sera fonctionnel en 2007. Parmi ces effets, il pourrait y avoir la production des trous noirs quantiques dans les collisions de particules élémentaires. Ce serait une découverte spectaculaire.

Un autre type de scénario de monde à branes a été élaboré par Lisa Randall, de l'université de Harvard, et Raman Sundrum, de l'université Johns Hopkins. Ils ont découvert que les dimensions supplémentaires pourraient avoir une taille infinie, à condition de supposer une constante cosmologique négative dans le monde à dimensions supérieures[36]. Il est remarquable que ce scénario soit également en accord avec toutes les observations faites à ce jour et il produit même des prédictions pour les observations à venir.

Ce sont des idées audacieuses auxquelles il est amusant de réfléchir. J'admire profondément leurs inventeurs. Ceci dit, je trouve problématiques les scénarios des mondes à branes. Ils sont vulnérables aux problèmes qui condamnèrent les tentatives initiales d'unification à travers les dimensions supérieures. Les scénarios des mondes à branes ne fonctionnent qu'en admettant des présupposés particuliers sur la géométrie des dimensions supplémentaires et sur la façon dont la surface tridimensionnelle de notre monde se pose parmi elles. À tous les problèmes dont ont souffert les vieilles théories de Kaluza-Klein s'en ajoutent de nouveaux. S'il peut y avoir une brane qui flotte dans un monde à dimensions supérieures, peut-il y en avoir plusieurs ? Et si les autres existent, à quelle fréquence entrent-elles en collision ? En effet, il existe des hypothèses selon lesquelles le Big Bang se serait produit à partir d'une collision des mondes à branes. Mais si une telle collision a pu se faire une fois, pourquoi ne s'est-elle jamais reproduite depuis ? Quelque quatorze milliards d'années ont passé. Peut-être est-ce parce que les branes sont rares, et dans

ce cas on revient à la situation où tout dépend de conditions soumises à un réglage fin. Il se pourrait aussi que les branes soient strictement parallèles l'une à l'autre et ne bougent pas beaucoup, ce qui mène à une autre condition de réglage fin.

Au-delà même de ces problèmes, je reste sceptique concernant ces scénarios parce qu'ils dépendent de choix particuliers des géométries du fond, et cela contredit la principale découverte d'Einstein sous la forme qu'il lui a donnée dans sa théorie de la relativité générale : que la géométrie d'espace-temps est dynamique et que la physique doit être formulée de manière indépendante du fond. Néanmoins, ces approches sont de la science telle qu'elle doit être : des idées audacieuses sont avancées, vérifiables par des expériences réalisables. Mais soyons clairs : si une de ces prédictions des mondes à branes est vraie, cela ne sera pas la validation de la théorie des cordes. Les théories des mondes à branes ont leur propre existence indépendante ; elles n'ont pas besoin de la théorie des cordes. Et il n'existe pas non plus de réalisation entièrement élaborée d'un modèle du monde à branes à l'intérieur de la théorie des cordes. Inversement, si aucune des prédictions des mondes à branes n'est vérifiée, cela ne falsifiera pas la théorie des cordes. Les mondes à branes ne sont qu'une des voies par lesquelles les dimensions supplémentaires de la théorie des cordes pourraient se manifester.

La deuxième prédiction générique de la théorie des cordes est que le monde est supersymétrique. Ici encore, on ne trouve pas de prédictions falsifiables, parce qu'on sait que la supersymétrie, si elle décrit vraiment le monde autour de nous, doit être brisée. Au chapitre 5, j'ai écrit qu'on pourrait voir la supersymétrie au LHC. C'est possible, mais absolument pas certain, et ce même si la supersymétrie est vraie.

Heureusement, il existe d'autres façons de tester la supersymétrie. L'une d'elles fait intervenir la matière noire. Dans plusieurs extensions supersymétriques du modèle standard, la plus légère des particules nouvelles est stable et sans charge. Cette nouvelle particule stable pourrait constituer la matière noire. Elle interagirait avec la matière ordinaire, mais seulement à travers la gravitation et la force nucléaire faible. On appelle les particules de ce genre les WIMP (*weakly interacting massive particles*), et quelques expériences ont déjà été réalisées pour les détecter. Ces détecteurs utilisent l'idée que les particules de matière noire interagiraient avec la matière ordinaire à travers la force nucléaire faible. Cela les rend très semblables aux versions lourdes des neutrinos, qui, eux aussi, n'interagissent avec la matière qu'à travers la gravitation et la force faible.

Malheureusement, puisque les théories supersymétriques ont tant de paramètres libres, il n'existe de prédictions précises ni pour la masse des WIMP ni pour la puissance de leur interaction. Toutefois, si la matière noire en est réellement constituée, on peut en déduire un intervalle de valeur pour leurs masses, étant admis qu'elles jouent le rôle qu'on croit dans la formation des galaxies. L'intervalle prédit est tout à fait en accord avec celui que la théorie et l'expérimentation suggèrent pour le superpartenaire le plus léger.

Les expérimentateurs ont cherché les WIMP à l'aide des détecteurs semblables à ceux qu'on utilise pour les neutrinos venant du soleil et des supernova lointaines. Une recherche approfondie a été réalisée, mais aucune WIMP n'a été trouvée à ce jour. Ce résultat n'est pas définitif : la conclusion en est que, si elles existent, les WIMP interagissent trop

faiblement pour déclencher une réponse des détecteurs actuels. On ne peut que supposer que, si elles avaient interagi avec autant de puissance que les neutrinos, elles auraient déjà été détectées. Toutefois, la découverte de la supersymétrie par quelque moyen que ce soit serait un triomphe spectaculaire de la physique.

La conclusion à retenir est que même si la théorie des cordes demande que le monde soit supersymétrique à une certaine échelle, elle ne fait pas de prédiction concernant cette échelle. Ainsi, si la supersymétrie n'est pas observée au LHC, cela ne falsifiera pas la théorie, car on aura la liberté totale d'ajuster l'échelle à laquelle elle doit être perçue. D'un autre côté, si la supersymétrie est découverte, cela ne validera pas la théorie des cordes. Il existe des théories ordinaires qui ont besoin de supersymétrie, comme l'extension supersymétrique minimale du modèle standard. Même parmi les théories quantiques de la gravitation, la supersymétrie n'appartient pas uniquement à la théorie des cordes ; par exemple, une approche alternative qu'on appelle *gravité quantique à boucles* est parfaitement compatible avec elle.

On arrive maintenant à la troisième prédiction générique de la théorie des cordes : que toutes les forces fondamentales soient unifiées à une certaine échelle. Comme dans les cas précédents, cette idée est plus large que les limites imposées par la théorie des cordes. Par conséquent, sa vérification ne prouverait pas la théorie des cordes ; en effet, celle-ci permet quelques formes différentes, toutes possibles, de l'unification. Mais il en existe une dont la majorité des théoriciens croient qu'elle représente la *grande unification*. Comme vu au chapitre 3, la grande unification établit une prédiction générique, à ce jour non vérifiée, que les protons doivent être instables et se décomposer à un certain taux. On a cherché la décomposition des protons dans les expériences et on ne l'a pas trouvée. Ces résultats (ou ce manque de résultats) ont anéanti quelques théories de grande unification, mais pas l'idée générale. Pourtant, l'échec des recherches sur la décomposition du proton fait peser une contrainte sur les théories qui sont encore possibles, y compris les théories supersymétriques.

Un grand nombre de théoriciens croient que les trois prédictions génériques seront confirmées. En conséquence, les expérimentateurs ont investi un effort énorme dans la recherche de preuves qui pourraient soutenir ces prédictions. Je n'exagérerais pas si je disais que des centaines de carrières y ont été consacrées et que des centaines de millions de dollars furent dépensées au cours des trente dernières années pour rechercher des preuves expérimentales de la grande unification, de la supersymétrie et des dimensions supérieures. Malgré ces efforts, nous n'avons aucune démonstration de ces hypothèses. La vérification d'au moins une de ces trois idées, même si on ne peut pas la considérer comme une validation directe de la théorie des cordes, serait néanmoins un premier signe que le *package deal* imposé par la théorie des cordes nous amène plus près, et non pas plus loin, de la réalité.

12
Ce que la théorie des cordes explique

Que devons-nous donc faire de l'étrange histoire de la théorie des cordes ? Plus de vingt ans ont passé depuis la première révolution des supercordes, vingt ans durant lesquels partout dans le monde la théorie des cordes a dominé la scène et attiré l'attention et les ressources de la physique théorique – plus de mille scientifiques de grand talent, les mieux formés, dans le monde entier, l'ont explorée. Bien qu'il y ait eu place pour un désaccord franc sur les perspectives de la théorie, on s'attendait à ce que, tôt ou tard, la science accumule les preuves qui permettraient d'arriver à un consensus sur sa validité. Soucieux de reconnaître que l'avenir est toujours ouvert, je voudrais clore cette partie du livre en offrant une évaluation de la théorie des cordes en tant que *proposition de théorie scientifique*.

Que je sois clair. Premièrement, je n'évalue pas la qualité du travail ; beaucoup de théoriciens des cordes sont des gens brillants et leur travail est de la plus haute qualité. Deuxièmement, je veux séparer la question de savoir si la théorie des cordes est un candidat convaincant à la théorie physique, de la question de savoir si la recherche au sein de cette théorie a mené, ou pas, à des avancées importantes en mathématiques, ou dans les autres problèmes de physique. Personne ne conteste le fait qu'une bonne quantité des mathématiques de premier plan provient de la théorie des cordes, et que notre compréhension de certaines théories de jauge a été approfondie grâce à la théorie des cordes. Mais l'utilité des produits dérivés, en mathématiques ou en d'autres domaines de la physique, ne prouve, ni ne réfute, la validité de la théorie des cordes en tant que théorie scientifique.

Ce que je veux évaluer est le degré auquel la théorie des cordes a rempli sa promesse originelle d'unifier la théorie quantique, la gravitation et la physique des particules élémentaires. Ou la théorie des cordes est, ou elle n'est pas le point culminant de la révolution scientifique qu'Einstein a commencée en 1905. Ce genre d'évaluation ne peut être fondé ni sur des hypothèses irréalistes ou des conjectures sans preuve, ni sur les espoirs des adeptes de la théorie. Il s'agit ici de faire de la science. Par conséquent, la vérité d'une théorie ne peut être évaluée que sur la base des résultats qui ont été publiés dans la littérature scientifique ; ainsi, on doit faire attention à distinguer entre conjecture, indication et preuve.

On peut se demander s'il n'est pas trop tôt pour faire une telle évaluation. Pourtant, la théorie des cordes a été en développement continu depuis plus de trente-cinq ans, et pendant plus de vingt ans elle a capté l'attention de beaucoup des plus brillants scientifiques du monde. Comme je l'ai déjà souligné plus haut, il n'existe pas de précédent en histoire des sciences, au moins depuis le XVIII[e] siècle, qu'une théorie majeure survive dix ans sans échouer ou accumuler des preuves théoriques et expérimentales impressionnantes. Tout expliquer par la difficulté technique des expériences n'est pas non plus convaincant, et ceci pour deux raisons. Premièrement, beaucoup de données que la théorie des cordes devait expliquer existent déjà, dans les valeurs des constantes des modèles standards de la physique des particules et de la cosmologie. Deuxièmement, même si les cordes sont censées être trop petites pour être observées directement, les théories précédentes ont, elles, presque toujours rapidement mené à l'invention d'expériences nouvelles, que personne n'aurait jamais pensé à réaliser sans ces théories.

Qui plus est, pour faire notre évaluation, beaucoup de preuves différentes sont à considérer. De nombreux spécialistes en théorie des cordes ont fourni un grand nombre d'éléments sur lesquels nous pouvons désormais travailler. De même, une information de valeur égale sera tirée des conjectures et des hypothèses qui sont restées ouvertes malgré une étude intensive. La majorité des conjectures clés qui ne sont pas résolues ont au moins dix ans d'âge, et il n'y a aucun signe qu'elles pourraient bientôt changer de statut.

Finalement, à la suite de la découverte du paysage très vaste des théories que j'ai décrit au chapitre 10, la théorie des cordes est en crise, ce qui conduit beaucoup de scientifiques à reconsidérer ses promesses. Ainsi, bien qu'on doive se rappeler que des développements nouveaux peuvent modifier le regard que nous portons sur la théorie, il semble que le moment est bien choisi pour tenter une évaluation de la théorie des cordes en tant que théorie scientifique.

Le premier pas dans l'évaluation de n'importe quelle théorie est sa comparaison avec l'observation et l'expérience. C'était le sujet du chapitre précédent. Nous avons appris que, même après tous les efforts accomplis pour expérimenter la théorie des cordes, il n'existe aucune possibilité réaliste de vérifier ou de falsifier définitivement une prédiction non équivoque de cette théorie, à l'aide d'une expérience qui serait actuellement réalisable. Certains scientifiques considèrent que c'est une raison suffisante pour renoncer à la théorie ; pourtant, il ne faut pas oublier que la théorie des cordes a été inventée pour résoudre quelques énigmes. Même en l'absence de tests expérimentaux, on pourrait vouloir soutenir une théorie qui donne des solutions convaincantes à des problèmes de grande importance. Dans le premier chapitre, j'ai décrit les cinq problèmes majeurs qui se présentaient à la physique théorique. La théorie qui achèvera la révolution einsteinienne doit les résoudre tous. Par conséquent, il serait approprié d'évaluer la théorie des cordes en se demandant dans quelle mesure celle-ci nous a fait progresser dans la résolution des grands problèmes.

Commençons par se rappeler ce qu'on sait exactement au sujet de la théorie des cordes.

Il faut dire tout d'abord qu'il n'existe pas de formulation de la théorie des cordes. Il n'existe pas, non plus, de proposition généralement acceptée concernant ces principes de base ou ces équations fondamentales. Il n'y a pas, non plus, de preuve qu'une telle formu-

lation complète existe. On sait que la théorie des cordes consiste, en grande partie, en des résultats approximatifs et des conjectures qui concernent les quatre classes de théories suivantes :

1. Les théories que nous comprenons mieux que les autres présentent des cordes qui se déplacent sur des fonds simples, comme un espace-temps plat à dix dimensions, où la géométrie du fond ne varie pas dans le temps et où la constante cosmologique est nulle. Il existe de nombreux cas où quelques-unes parmi les neuf dimensions spatiales sont enroulées et les autres restent plates. Ce sont les théories que nous comprenons mieux, parce que sur ces fonds-là nous savons faire des calculs détaillés du mouvement des cordes et des branes et de leurs interactions.

   Dans ces théories, on décrit le mouvement et l'interaction des cordes sur les fonds spatiaux à l'aide d'une procédure d'approximation qu'on appelle « théorie des perturbations ». Il a été démontré que ces théories sont bien définies et donnent des prédictions finies et cohérentes jusqu'au deuxième ordre du schéma d'approximation. D'autres résultats témoignent de la cohérence complète de ces théories, mais, à ce jour, ne la prouvent pas. De plus, un grand nombre de résultats et de conjectures décrivent un réseau de relations de dualité entre ces théories.

   Pourtant, chacune de ces théories est en désaccord avec les faits établis à propos de notre monde. La plupart d'entre elles possèdent une supersymétrie non brisée, qui n'est pas observée dans le monde réel. Certaines, peu nombreuses, qui n'ont pas de supersymétrie non brisée, prédisent que les fermions et les bosons ont des superpartenaires de masse égale, ce qui n'est pas observé non plus ; elles prédisent aussi l'existence de forces à portée infinie venant s'ajouter à la gravitation et à l'électromagnétisme, quelque chose qui, à nouveau, n'a pas été observé.
2. Dans le cas d'un monde avec une constante cosmologique négative, il y a un argument en faveur de l'existence d'une classe de théories des cordes, à partir de la conjecture de Maldacena. Il a établi un lien entre la théorie des cordes dans certains espaces à constante cosmologique négative et certaines théories supersymétriques de jauge. Jusque-là, on ne pouvait pas construire explicitement ces théories des cordes, ni les étudier, exceptés certains cas très particuliers, possédant des symétries à un degré élevé. Les versions plus faibles de la conjecture de Maldacena sont appuyées par tout un ensemble de preuves, mais nous ne savons pas quelle version de la conjecture est vraie. Si c'est la version la plus forte, la théorie des cordes est alors équivalente à une théorie de jauge, et cette relation fournit une description exacte des théories des cordes avec la constante cosmologique négative. Pourtant, ces théories ne peuvent pas, non plus, décrire notre univers, puisque l'on sait que la constante cosmologique est en réalité positive.
3. On a spéculé sur l'existence d'un nombre infini d'autres théorie qui correspondraient aux cordes se déplaçant sur des fonds plus compliqués, où la constante cosmologique ne serait pas égale à zéro et où la géométrie spatio-temporelle du fond évoluerait dans le temps, ou encore telles que le fond inclurait des branes et d'autres champs. Ceci comprend un grand nombre de cas avec la constante cosmologique positive, en accord avec l'observation. Jusqu'à ce jour, il a été impossible de définir précisément ces théories des

cordes, ni de faire des calculs explicites pour en tirer des conclusions. Les indications de leur existence sont fondées sur la satisfaction de conditions nécessaires, mais de loin non suffisantes.

4. En vingt-six dimensions spatio-temporelles, il existe une théorie, sans fermions ni supersymétrie, qui s'appelle « corde bosonique ». Cette théorie contient des tachyons qui engendrent des expressions infinies, entraînant l'incohérence de la théorie.

On a proposé que toutes les théories construites ou conjecturées fassent partie d'une théorie plus profonde, appelée M-théorie. L'idée centrale en est que toutes les théories comprises correspondent à des solutions de la M-théorie. Les indications de son existence proviennent des nombreuses relations de dualité, dont on démontre rigoureusement ou dont on énonce sous forme de conjecture la validité grâce aux différentes théories des cordes, mais jusqu'à ce jour personne n'a été capable de formuler les principes fondamentaux de la M-théorie, ni d'écrire ses lois et ses équations.

Après ce tour d'horizon, on comprend pourquoi toute évaluation de la théorie des cordes soulèvera nécessairement des controverses. Si on limite notre attention aux théories dont on sait qu'elles existent – celles qui nous permettent de faire des calculs véritables et qui produisent des prédictions –, alors on doit conclure que la théorie des cordes n'a rien à voir avec la nature, parce que chacune des théories de ce type est en désaccord avec les données expérimentales. Ainsi, l'espoir que la théorie des cordes puisse décrire notre monde repose exclusivement sur la croyance à des théories des cordes dont l'existence n'est qu'une conjecture.

Néanmoins, beaucoup de théoriciens des cordes très actifs dans ce domaine croient que les théories conjecturées existent réellement. Il semble que cette croyance soit fondée sur le raisonnement indirect suivant :

1. Ils avancent l'hypothèse qu'une formulation générale de la théorie des cordes existe et est définie par des principes et des équations inconnus. Ensuite, ils énoncent – toujours sous forme de conjecture – que cette théorie a plusieurs solutions, dont chacune fournit une théorie cohérente des cordes qui se propagent sur un certain fond spatio-temporel.
2. Puis, ils écrivent des équations dont on suppose qu'elles sont des approximations aux vraies équations de la théorie inconnue. Il est par la suite énoncé, encore sous forme de conjecture, que ces équations approximées donnent des conditions nécessaires, mais pas suffisantes, pour que le fond ait une théorie des cordes cohérente. Ces équations sont des versions de la théorie de Kaluza-Klein en ce qu'elles incluent la relativité générale étendue aux dimensions supérieures.
3. Pour chaque solution de ces équations approximatives, ils avancent une autre conjecture, qui consiste à dire que la théorie des cordes existe même si celle-ci ne peut pas être décrite explicitement.

Le problème que pose ce raisonnement apparaît dès sa première étape, qui n'est que conjecture. On ne sait pas si la théorie ou les équations qui la définissent existent réellement. Ainsi, la deuxième étape est aussi pure conjecture. De plus, on ne sait pas si les

équations approximatives, qui ne sont que conjecturées, fournissent des conditions suffisantes, et pas seulement nécessaires, à l'existence de la théorie des cordes.

Ce genre de raisonnement est dangereux, puisqu'il postule ce qui, en fait, a encore besoin d'être démontré. Si on croit aux présupposés de l'argument, alors les théories dont on suppose l'existence peuvent être étudiées en tant qu'exemples de la théorie des cordes. Mais il faut se rappeler qu'elles *ne* sont *pas* des théories des cordes, ni des théories tout court, mais seulement des solutions aux équations classiques. Leur importance dépend entièrement de l'existence de théories que personne n'a su formuler et de conjectures que personne n'a su prouver. Étant donné la situation, il semble qu'il n'y ait aucune raison valable de croire qu'une théorie des cordes existe tant qu'elle n'a pas été construite explicitement.

Quelles conclusions peut-on tirer de tout cela ? Premièrement, vu l'état incomplet des connaissances sur la théorie des cordes, tous les futurs sont possibles. À en juger par ce que l'on sait actuellement, une théorie pourrait voir le jour qui remplirait les espoirs initiaux. Il est également possible qu'il n'y ait pas réellement de théorie véritable, et tout ce qu'on aura, ne sera, à jamais, qu'un vaste ensemble de résultats approximés concernant des cas particuliers, qui tiennent uniquement grâce au fait que les cas en question sont fortement contraints par des symétries particulières.

La conclusion inévitable semble être que la théorie des cordes – c'est-à-dire la théorie décrivant des cordes en mouvement sur les fonds spatio-temporels –, ne sera pas, en elle-même, la théorie fondamentale. *Si la théorie des cordes peut être pertinente pour la physique, ce n'est que parce qu'elle fournit des indications sur l'existence d'une théorie plus fondamentale*. Ceci est généralement bien accepté, et cette théorie fondamentale a un nom : M-théorie – même si on ne l'a pas encore inventée.

Mais cela ne va pas aussi mal qu'il semblerait au premier regard. Par exemple, on ne sait pas encore si la plupart des théories quantiques des champs existent d'un point de vue rigoureux. Les théories quantiques des champs qu'étudient les physiciens des particules, y compris l'électrodynamique quantique, la chromodynamique quantique et le modèle standard, partagent avec la théorie des cordes le fait qu'elles ne sont définies qu'en termes d'une procédure d'approximation. (Bien qu'on ait démontré que ces théories sont finitaires et cohérentes à tous les ordres d'approximation.) Pourtant, il existe de bonnes raisons de croire que le modèle standard n'existe pas en tant que théorie mathématique rigoureusement définie. Cela n'est en rien perturbant étant donné que nous croyons que le modèle standard n'est qu'un pas vers une théorie plus profonde.

On a cru au début que la théorie des cordes était cette théorie plus profonde. À ce jour, avec toutes les preuves en main, nous devons admettre qu'elle ne l'est pas. Comme les théories quantiques des champs, la théorie des cordes est une construction approximée, qui (dans la mesure où elle est pertinente pour la description de la nature) suggère l'existence d'une théorie plus fondamentale. Cela ne rend pas la théorie des cordes nécessairement non pertinente mais, pour démontrer qu'elle vaut la peine, elle doit alors faire au moins aussi bien que le modèle standard. Elle doit prédire des éléments nouveaux qui seront par la suite découverts et elle doit expliquer les phénomènes déjà observés. Nous

avons vu qu'à ce jour, la théorie des cordes ne réalise pas le premier de ces impératifs. Est-elle capable de réaliser le second ?

On peut répondre à cette question en évaluant le degré de réussite de la théorie des cordes dans sa réponse aux cinq grands problèmes posés au chapitre 1.

Commençons par une bonne nouvelle. La théorie des cordes a été initialement motivée par le troisième problème, celui de l'unification des particules et des forces. A-t-elle tenu la promesse d'être cette théorie unifiée ? Oui, et assez bien. Sur les fonds spatio-temporels où sont définies les théories des cordes cohérentes, les vibrations de la corde comprennent les états qui correspondent à tous les types connus de la matière et des forces. Le graviton – la particule qui porte la force gravitationnelle – provient des vibrations des boucles (c'est-à-dire, des cordes fermées). Le photon, qui porte la force électromagnétique, émerge également des vibrations de la corde. Les champs de jauge plus compliqués – utilisés dans les modèles des interactions nucléaires fortes et faibles – en sont aussi automatiquement issus, c'est-à-dire que la théorie des cordes prédit généralement qu'il existe des champs de jauge semblables à ceux-ci, bien qu'elle ne prédise pas le mélange particulier des forces que nous observons dans la nature.

Ainsi, au moins au niveau des bosons – ou des particules qui portent les forces – sur le fond spatio-temporel, la théorie des cordes unifie la gravitation avec les autres forces. Les quatre forces fondamentales émergent en tant que vibrations d'un seul objet fondamental, la corde.

Qu'en est-il de l'unification des bosons avec les particules qui constituent la matière, comme les quarks, les électrons et les neutrinos ? Il s'avère que ces particules émergent également en tant qu'états vibrationnels des cordes, lorsque la supersymétrie est ajoutée. Ainsi, la corde supersymétrique unifie tous les types de particules.

De plus, la théorie des cordes réussit tout cela grâce à une loi simple : une corde se propage à travers l'espace-temps de telle sorte qu'elle occupe une aire spatio-temporelle minimale. Il n'est pas nécessaire d'avoir des lois séparées pour décrire l'interaction des particules ; les lois d'interaction des cordes suivent directement la loi simple qui décrit leur propagation. Les différentes forces et particules n'étant que des vibrations des cordes, les lois qui les régissent en découlent également. En effet, tout un ensemble d'équations qui décrivent la propagation et l'interaction des forces et des particules a été dérivé de la simple condition que la corde se propage de telle sorte qu'elle occupe une aire minimale dans l'espace-temps. Cette élégante simplicité est précisément ce qui nous a fascinés et ce qui continue de fasciner beaucoup de scientifiques : une seule entité qui satisfait à une loi simple.

Qu'en est-il du premier problème posé au chapitre 1, à savoir le *problème de la gravité quantique* ? Ici, la situation est plus ambiguë. La bonne nouvelle est que les particules qui portent la force gravitationnelle proviennent des vibrations des cordes, mais aussi que la force gravitationnelle exercée par une particule est proportionnelle à sa masse. Cela mène-t-il à une unification cohérente de la gravitation avec la théorie quantique ? Comme je l'ai souligné dans les chapitres 1 et 6, la théorie générale de relativité d'Einstein est une théorie indépendante du fond. Cela signifie que toute la géométrie de l'espace et du temps est

dynamique ; rien n'est fixe. Une théorie quantique de la gravitation doit, elle aussi, être indépendante du fond. L'espace et le temps doivent en émerger et surtout ne pas servir de toile de fond à l'action des cordes.

Actuellement, la théorie des cordes est formulée en tant que théorie dépendante du fond. C'est sa principale faiblesse si on la considère comme une candidate à la théorie quantique de la gravitation. On comprend la théorie des cordes en termes de cordes et d'autres objets qui se déplacent sur des fonds géométriques spatiaux classiques et fixes, qui n'évoluent pas dans le temps. La découverte d'Einstein que la géométrie de l'espace et du temps est dynamique n'est donc pas incluse dans la théorie des cordes.

Il est intéressant de réfléchir au fait qu'à part quelques théories unidimensionnelles particulières, aucune théorie quantique des champs rigoureuse n'existe, qui soit dépendante du fond. Toutes ces théories sont définies en termes de procédures d'approximation. Il est possible que la théorie des cordes partage avec elles cette propriété parce qu'elle dépend du fond. Il est alors tentant de supposer que toute théorie quantique des champs cohérente doit être indépendante du fond. Si cela est vrai, cela impliquerait que l'unification de la théorie quantique et de la relativité générale n'est pas une simple option, mais une obligation.

Il existe des arguments portant à croire que la théorie de la relativité générale pourrait, dans un certain sens, être dérivée de la théorie des cordes. Ce sont des arguments sérieux, et il est important de comprendre dans quel sens ils sont vrais ; car comment est-il possible qu'une théorie indépendante du fond soit dérivée d'une théorie dépendante du fond ? Comment une théorie où la géométrie d'espace-temps est dynamique peut-elle être dérivée d'une théorie qui nécessite une géométrie fixe ?

L'argument est le suivant. On considère une géométrie d'espace-temps et on se demande s'il existe une description quantique cohérente des cordes qui se déplacent et interagissent dans cette géométrie. Lorsqu'on étudie cette question, on trouve que la condition nécessaire pour que la théorie des cordes soit cohérente est que, dans une certaine approximation, la géométrie d'espace-temps soit une solution aux équations de la version de la relativité générale adaptée aux dimensions supérieures. Par conséquent, cela fait sens que les équations de la relativité générale *émergent* des conditions de consistance du mouvement de la corde. Ceci est au fondement même des arguments avancés par les théoriciens des cordes pour montrer que la relativité générale peut être dérivée de la théorie des cordes.

Pourtant, un problème demeure. Ce que je viens de décrire est le cas pour une corde bosonique initiale en vingt-six dimensions. Mais comme nous l'avons vu, cette théorie a une instabilité, le tachyon, elle n'est donc pas vraiment viable. Pour la rendre stable, on doit la rendre supersymétrique. Et la supersymétrie fait apparaître des conditions nécessaires supplémentaires auxquelles doit satisfaire la géométrie du fond. Actuellement, les seules théories supersymétriques des cordes connues en détail et dont on sait qu'elles sont cohérentes, sont définies sur les fonds spatio-temporels n'évoluant pas dans le temps[37]. Par conséquent, dans ces situations, il est impossible de dire que l'ensemble de la théorie générale de la relativité peut être déduit comme une approximation de la théorie supersymétri-

que des cordes. Il est vrai que plusieurs solutions des équations de la relativité générale sont retrouvées de cette façon, y compris toutes les solutions où certaines dimensions sont plates et d'autres, courbes. Mais ce sont des solutions très particulières ; la solution générique de la relativité générale décrit un monde dont la géométrie d'espace-temps varie dans le temps. C'est l'intuition essentielle d'Einstein d'un espace-temps dynamique, en évolution. On ne peut pas considérer uniquement ces solutions indépendantes du temps et continuer à dire que la relativité générale est dérivée de la théorie des cordes. On ne peut pas, non plus, affirmer qu'on a déjà une théorie de la gravitation, puisqu'on a observé de nombreux phénomènes gravitationnels dépendants du temps.

En réponse, certains théoriciens des cordes avancent la conjecture suivante : il existerait des théories des cordes cohérentes sur les fonds spatio-temporels qui varieraient dans le temps, mais celles-ci sont beaucoup plus difficiles à étudier. Elles ne peuvent pas être supersymétriques, et, à ma connaissance, il n'en existe pas de construction générale explicite. Les indications concernant ces théories sont de deux sortes. Premièrement, il y a un argument selon lequel il est au moins possible d'introduire de petites quantités de dépendance au temps sans perturber les conditions nécessaires pour éliminer le tachyon et pour que la théorie soit cohérente. Cet argument est plausible, mais en l'absence d'une construction détaillée, il est difficile de juger s'il est vrai. Deuxièmement, certains cas particuliers ont été étudiés en détail. Pourtant, ceux qui ont le mieux réussi ont une symétrie temporelle cachée et, par conséquent, ne sont pas bons. D'autres ont des problèmes potentiels avec les instabilités, ou ils n'ont été développés qu'au niveau des équations classiques qui ne vont pas assez loin pour qu'on puisse juger de leur existence réelle. D'autres encore ont une dépendance au temps beaucoup trop rapide, régie par l'échelle de la théorie des cordes elle-même.

En l'absence de construction explicite de la théorie des cordes dans un espace-temps générique dépendant du temps et en l'absence d'arguments plausibles sur son existence sans présupposer celle de la métathéorie, on ne peut pas affirmer déduire toute la relativité générale de la théorie des cordes. Ce problème reste en suspens et seules les recherches futures en décideront.

On peut encore se demander si la théorie des cordes fournit une théorie cohérente, qui inclut la gravitation et la théorie quantique, dans les cas où l'on sait explicitement construire la théorie. C'est-à-dire peut-on au moins décrire des ondes gravitationnelles et des forces si faibles qu'on ne peut les voir qu'en tant que petites ondulations dans la géométrie de l'espace ? Peut-on le faire de façon entièrement cohérente avec la théorie quantique ? Ceci est possible dans une certaine approximation. Jusqu'à maintenant, les tentatives de le prouver au-delà de ce niveau d'approximation n'ont pas entièrement réussi, bien que beaucoup d'indications positives aient été recueillies et qu'aucun contre-exemple ne soit apparu. C'est donc une croyance commune à plusieurs théoriciens des cordes. En même temps, demeurent des obstacles substantiels pour le prouver complètement. La méthode d'approximation, à savoir la théorie des perturbations, ne donne de réponses aux questions physiques qu'à l'aide d'une somme d'un nombre infini de termes. Pour plusieurs des premiers termes, chacun d'eux est plus petit que le précédent, et on obtient donc une ap-

proximation en en calculant seulement quelques-uns. C'est ce qu'on fait d'habitude en théorie des cordes et en théorie quantique des champs. Par conséquent, pour démontrer la finitude de la théorie, on doit démontrer que, quel que soit le calcul dont on aura besoin pour répondre à une question physique, chacun des termes de cette suite infinie de nombres sera fini.

Voici où nous en sommes actuellement : le premier terme est de toute évidence fini, mais il correspond à la physique classique et, par conséquent, ne contient pas de mécanique quantique. Pour le deuxième terme, qui est le premier à pouvoir avoir des infinis, on peut facilement démontrer qu'il est fini. Il nous a fallu attendre l'année 2001 pour obtenir la preuve définitive de la finitude du troisième terme. C'est le fruit d'un travail héroïque, mené pendant plusieurs années par Eric D'Hoker à UCLA et par son collaborateur Duong H. Phong à l'Université de Columbia. Depuis, ils se sont lancés dans la résolution du quatrième terme[38]. Ils ont déjà compris beaucoup de choses à son propos, mais à ce jour, ils ne peuvent pas prouver qu'il est fini. Reste à voir s'ils réussiront à prouver que tous les termes potentiellement infinis sont finis. Le problème est, en partie, lié au fait que l'algorithme utilisé pour décrire le contenu de la théorie devient ambigu après le deuxième terme, et qu'ils ont donc besoin de trouver d'abord la bonne définition de la théorie ; après seulement pourront-ils essayer de démontrer que les réponses qu'elle fournit sont finies.

Comment est-ce possible ? N'ai-je pas dit moi-même que la théorie des cordes était fondée sur une loi simple ? Le problème est que la loi est simple seulement si on l'applique à la théorie initiale en vingt-six dimensions. Quand on y ajoute la supersymétrie, tout devient beaucoup plus compliqué.

Il existe encore des résultats qui montrent, pour chaque terme, que certaines expressions potentiellement infinies, qui auraient pu survenir, ne surviennent pas. Une preuve puissante allant dans ce sens a été publiée en 1992 par Stanley Mandelstam. Récemment, un grand progrès a été fait par Nathan Berkovits, un physicien américain qui a décidé avec bonheur de partir travailler à São Paulo. Berkovits a inventé une nouvelle formulation de la théorie des cordes. Il a réussi à donner une preuve valable pour tous les termes de la théorie des perturbations, en ajoutant seulement une paire de présupposés supplémentaires. Pour l'instant, il est trop tôt pour juger s'il sera facile de se débarrasser de ces présupposés supplémentaires. Pourtant, le travail de Berkovits constitue déjà un progrès substantiel vers la preuve complète. Le problème de la finitude n'est pas celui qui intéresse le plus la majorité des théoriciens des cordes, et j'ai un respect infini pour ceux, peu nombreux, qui travaillent encore sur cette question difficile.

Il existe encore un autre problème assez inquiétant concernant la finitude. Au bout du compte, même si chaque terme d'un tel calcul est fini, le résultat final reste la somme de tous ces termes. Puisqu'il en existe un nombre infini à additionner, le résultat pourrait donc encore être infini. Bien que cette addition n'ait pas encore été réalisée, il existe des indications (trop techniques pour que je les expose ici) portant à croire que le résultat sera, en effet, infini. Une autre façon de le dire consiste à remarquer que la procédure d'approximation se rapproche beaucoup des prédictions réelles, pour ensuite s'éloigner

d'elles et diverger. Ceci est un trait commun des théories quantiques. Il signifie que la théorie des perturbations, bien qu'elle soit un outil utile, ne peut pas être utilisée pour définir la théorie.

À en juger par les signes disponibles à ce jour, sans qu'il y ait ni preuve ni contre-exemple, il est simplement impossible de savoir si la théorie des cordes est finitaire. Les indications suggèrent des lectures opposées. Après beaucoup d'effort (bien que les chercheurs impliqués ne soient pas nombreux), on a trouvé quelques preuves partielles. Cette situation peut être soit un signe très clair que la conjecture est vraie, soit que quelque chose ne marche pas bien. Si des physiciens de talent ont essayé et échoué et si aucune tentative n'aboutit, il se pourrait que l'hypothèse qu'ils essayent de démontrer soit fausse. La raison pour laquelle le concept de preuve a été inventé en mathématiques et érigé comme un critère de validité d'une théorie, est que l'intuition humaine s'est trompée plus d'une fois. Des conjectures auxquelles tout le monde avait cru se révélèrent parfois fausses. Et ceci n'est pas une question de rigueur mathématique. Typiquement, les physiciens n'aspirent pas à atteindre le même niveau de rigueur que celui exigé par leurs cousins mathématiciens. Il existe un grand nombre de résultats théoriques intéressants qui sont largement acceptés, et qui n'ont pourtant pas de preuve mathématique. Mais nous ne sommes pas en présence d'un tel cas. Il n'existe pas de preuve de la finitude de la théorie des cordes, même au niveau de rigueur exigé par les physiciens.

Au vu de tout cela, je n'ai pas de position sur ce qu'il adviendra de la théorie supersymétrique des cordes, qui peut se révéler finitaire ou pas. Mais si l'on croit vraiment qu'une chose aussi importante pour la théorie est vraie, alors on doit s'investir pour transformer cette croyance en une preuve. Évidemment, nous connaissons de nombreux cas de conjectures indémontrables pour des générations entières, généralement en raison d'un élément fondamental manquant. Alors, même si le résultat final confirme ce que tout le monde croyait, l'effort est habituellement récompensé par l'approfondissement de la connaissance du domaine mathématique particulier qui a produit la conjecture.

Nous reviendrons sur la question de savoir pourquoi la finitude de la théorie est si controversée. Pour l'instant, on doit simplement remarquer que ce n'est pas un exemple isolé. Certaines parmi les conjectures centrales qui étaient à la base des deux révolutions des cordes sont restées sans preuve, parmi elles la S-dualité et la conjecture de Maldacena. Dans les deux cas, il existe de nombreuses indications que telle ou telle autre forme de la relation entre deux théories pourrait être validée. Même si les strictes équivalences requises par les conjectures sont fausses, celles-ci donnent lieu à des concepts et à des résultats importants. Mais lorsque l'on fait sérieusement les comptes, on doit distinguer entre conjecture, indication et preuve.

Selon certains, la conjecture de Maldacena fournit la preuve que la théorie des cordes produit la bonne théorie quantique de la gravitation, au moins dans le cas de certaines géométries. Ils affirment que la théorie des cordes, dans certains cas, est strictement équivalente à la théorie de jauge ordinaire en trois dimensions spatiales, produisant ainsi la bonne théorie quantique de la gravitation à laquelle on peut faire confiance quel que soit l'ordre d'approximation.

Le problème avec cette affirmation est que, comme nous l'avons vu, la forme forte de la conjecture de Maldacena reste non démontrée. Il existe des indications convaincantes d'une relation entre la théorie supersymétrique des cordes en dix dimensions, celle de Maldacena, et la superthéorie maximale de jauge ; mais ce que nous avons trouvé à ce jour ne prouve pas la conjecture en entier. Les indications dont on dispose peuvent aussi s'expliquer par l'existence d'une simple correspondance partielle entre deux théories, dont aucune n'est définie précisément. (Récemment, nous avons progressé dans notre approche de la théorie de jauge par le biais d'un deuxième schéma d'approximation, appelé « théorie de jauge sur réseau ».) Les indications actuelles sont cohérentes avec la conjecture de Maldacena selon laquelle l'équivalence complète est fausse, soit parce que les deux théories sont en fait différentes, soit parce que les deux n'existent pas au sens strict. Or, si la forme forte de la conjecture de Maldacena est vraie – ce qui est aussi cohérent avec les indications actuelles –, alors il sera vrai aussi que la théorie des cordes fournit des théories quantiques de la gravitation correctes dans le cas particulier des fonds spatio-temporels à constante cosmologique négative. En plus, ces théories seraient en partie indépendantes du fond, puisque l'espace à neuf dimensions est généré à partir de la physique de l'espace tridimensionnel.

Il existe d'autres indications que la théorie des cordes puisse fournir l'unification de la gravitation avec la théorie quantique. Les deux résultats les plus concluants comprennent les branes et les trous noirs. Ils sont extraordinaires, mais, comme on l'a vu au chapitre 9, ils ne vont pas assez loin. Jusque-là, ils ont été limités à quelques trous noirs très particuliers, et on n'a que très peu d'espoir que les résultats précis soient bientôt étendus aux trous noirs en général, y compris deux types de trous noirs qu'on pense trouver dans la nature. Ces résultats peuvent être dus à une symétrie supplémentaire que possèdent ces trous noirs particuliers. Finalement, les résultats de la théorie des cordes n'incluent pas de description réelle de la géométrie quantique des trous noirs en question ; ils sont limités à l'étude des systèmes modèles de branes, qui partagent beaucoup de caractéristiques avec les trous noirs, mais existent dans l'espace-temps plat ordinaire, et on les étudie dans l'approximation où la force gravitationnelle est éteinte.

Certains disent que les systèmes de branes extrémaux deviendront des trous noirs lorsqu'on aura rallumé la force de gravité. Mais la théorie des cordes ne peut pas soutenir cet argument avec une description détaillée de la façon dont se forme un trou noir. Pour pourvoir le faire, on aurait besoin d'une théorie des cordes qui fonctionne dans un espace-temps qui évolue dans le temps, mais nous savons déjà qu'à ce jour, de telles choses n'existent pas.

Depuis les premiers résultats concernant les trous noirs, un certain nombre de propositions pleines d'imagination ont vu le jour pour décrire les trous noirs réels à l'aide de la théorie des cordes. Mais elles ont toutes souffert d'un problème général, qui est que chaque fois qu'on s'éloigne des trous noirs très particuliers avec lesquels on peut utiliser la supersymétrie pour faire les calculs, elles échouent dans la tentative de fournir des résultats précis. Lorsqu'on étudie les trous noirs ordinaires ou lorsqu'on essaye de voir ce qui se passe à l'intérieur de la singularité, on entre inévitablement dans un régime où la géomé-

trie d'espace-temps évolue dans le temps. La supersymétrie ne peut pas fonctionner ici, ni tous les beaux outils de calcul qui en dépendent. Par conséquent, on se retrouve avec le même dilemme que celui qui afflige tant de recherches en théorie des cordes : on obtient de formidables résultats dans des cas très particuliers, mais on est incapable de savoir si ces résultats tiennent la route pour l'ensemble de la théorie ou s'ils sont corrects uniquement pour les cas particuliers que nous pouvons calculer.

Étant donné ces limitations, peut-on dire que la théorie des cordes résout les énigmes de l'entropie des trous noirs, de leur température et de la perte d'information impliquée par les découvertes de Jacob Bekenstein et Stephen Hawking ? La réponse à cette question est que, bien qu'on possède des résultats encourageants, la théorie des cordes ne peut pas encore affirmer avoir résolu ces problèmes. Pour les trous noirs extrémaux et proches des extrêmes, les calculs utilisant les systèmes modèles de branes reproduisent, en effet, tous les détails des formules qui décrivent la thermodynamique des trous noirs correspondants. Pourtant, ce ne sont pas des trous noirs, seulement des systèmes restreints par l'obligation d'avoir une quantité assez élevée de supersymétrie pour pouvoir en déduire les propriétés thermiques des trous noirs. Les résultats ne fournissent pas de description de la géométrie quantique réelle des trous noirs. Par conséquent, ils n'expliquent pas les résultats de Bekenstein et Hawking en termes d'une description microscopique des trous noirs. De plus, comme je l'ai dit, ces résultats ne s'appliquent qu'à une classe très particulière de trous noirs qui n'ont pas un grand intérêt physique.

Pour résumer : au vu des résultats actuels, on ne peut pas affirmer avec certitude que la théorie des cordes résoudra le problème de la gravité quantique. Les indications sont confuses. Selon une approximation, il semble que la théorie des cordes unifie de façon cohérente la théorie quantique et la gravitation et donne des réponses raisonnables et finies. Mais il est difficile de décider si cela est vrai à propos de toute la théorie. Il existe des indications qui soutiennent quelque chose qui ressemble à la conjecture de Maldacena, mais il n'existe pas de preuve de la conjecture complète, et ce n'est que la conjecture complète qui pourra nous permettre d'affirmer l'existence de la bonne théorie quantique de la gravitation. L'image donnée par les trous noirs est tout à fait impressionnante, mais elle vaut seulement pour les trous noirs atypiques dont la théorie des cordes sait construire les modèles. Au-delà, demeure l'éternel problème : la théorie des cordes n'est pas indépendante du fond ; ainsi, même avec la limitation en question, elle ne peut, à ce jour, décrire autre chose que des fonds statiques dont la géométrie n'évolue pas dans le temps.

Ce qu'on *peut* dire est que, en tenant compte de ces limitations, il existe des indications que la théorie des cordes tend vers l'existence d'une unification cohérente de la gravité et de la théorie quantique. Mais la théorie des cordes est-elle en soi une unification cohérente ? En l'absence de solution aux problèmes discutés plus haut, cela paraît peu probable.

Tournons-nous maintenant vers les autres problèmes posés au premier chapitre. Le quatrième d'entre eux consiste à expliquer les valeurs des paramètres du modèle standard de la physique des particules. Il est clair que la théorie des cordes a échoué sur ce plan, et il n'y a aucune raison de croire qu'elle puisse réussir plus tard. Au contraire, comme vu au chapitre 10, les éléments actuels nous indiquent qu'il existe un grand nombre de théories des

cordes, toutes cohérentes, si bien qu'on pourra en tirer toutes les prédictions que l'on veut pour les valeurs des paramètres du modèle standard.

Pour le cinquième problème (expliquer ce que sont la matière et l'énergie noires et expliquer les valeurs des constantes en cosmologie), la situation n'est pas non plus très favorable. Puisqu'elles incluent typiquement beaucoup plus de particules et de forces qu'observées, les théories des cordes offrent, en effet, un certain nombre de candidats pour la matière noire et pour l'énergie noire. Quelques-unes parmi les particules supplémentaires pourraient être la matière noire. Quelques-unes parmi les forces pourraient être l'énergie noire. Mais la théorie des cordes n'offre aucune prédiction *spécifique* qui nous permette de savoir lequel parmi la multitude de candidats est la matière noire ou l'énergie noire.

Par exemple, parmi les candidats possibles au poste de matière noire, on trouve une particule, appelée *axion* (ce terme se réfère à certaines propriétés que je ne décrirai pas ici). Plusieurs, mais pas toutes les théories des cordes contiennent des axions ; au premier regard, cela semble être une bonne nouvelle. Mais la majorité des théories des cordes qui contiennent des axions leurs prédisent des propriétés en désaccord avec le modèle standard cosmologique. Par conséquent, la nouvelle n'est pas si bonne. Toutefois, il existe tant de théories des cordes que certaines d'entre elles pourraient avoir des axions compatibles avec le modèle cosmologique. Il n'est également pas exclu que le modèle cosmologique se trompe sur ce point. En conséquence, il paraît raisonnable de dire que si les axions sont la matière noire, alors cette situation est consistante avec la théorie des cordes. Mais nous ne pouvons pas aller jusqu'à affirmer que la théorie des cordes prédit que la matière noire est un axion, ni même fait des prédictions supplémentaires telles que, si on en tenait compte, les observations de la matière noire pourraient falsifier la théorie des cordes.

Le problème qui reste sur notre liste est celui qui porte le numéro 2 : le *problème des fondements de la mécanique quantique*. La théorie des cordes propose-t-elle une solution quelconque à ce problème ? La réponse est non. La théorie des cordes, à ce jour, ne dit rien, directement, à propos des fondements de la théorie quantique.

Voici donc où en est notre évaluation. Parmi les cinq grands problèmes, la théorie des cordes peut potentiellement en résoudre un en entier, l'unification des particules et des forces. C'est ce problème qui a motivé l'invention de la théorie des cordes et, depuis, ce succès de la théorie fut le plus impressionnant.

Il existe des indications selon lesquelles la théorie des cordes tend vers une solution au problème de la gravité quantique, mais, au mieux, elle tend vers l'existence d'une théorie plus profonde, qui résoudrait le problème de la gravité quantique, au lieu d'en être elle-même la solution.

Actuellement, la théorie des cordes ne résout aucun des trois problèmes qui restent. Il semble qu'elle est incapable d'expliquer les paramètres des modèles standard de la physique des particules et de la cosmologie. Elle fournit une liste de candidats potentiels aux postes de matière et d'énergie noires, mais elle ne prédit pas de façon unique, ni n'explique un fait quelconque les concernant. Et la théorie des cordes n'a aussi rien à nous apprendre sur le mystère le plus opaque : le sens de la théorie quantique.

En plus de cela, y a-t-il d'autres réussites de la théorie des cordes qu'il faudrait mentionner ? On cherche habituellement les réussites d'une théorie dans ses prédictions concernant les observations et les expériences nouvelles. Or, nous le savons, la théorie des cordes ne fait absolument aucune prédiction de ce genre. Sa seule force est d'unifier les types de particules et de forces que nous connaissons. Si, par exemple, nous ne savions rien de la gravitation, la théorie des cordes aurait pu prédire son existence. Certes, ce n'est pas rien, mais ce n'est pas non plus une prédiction pour une expérience nouvelle. Plus encore, il n'y a pas de possibilités de falsifier la théorie – c'est-à-dire de la prouver fausse —, par le simple fait de réaliser une expérience ou une observation qui sera en désaccord avec les prédictions de la théorie des cordes.

Si la théorie des cordes ne fait pas de prédictions nouvelles, on peut au moins se demander si elle tient compte des données déjà recueillies. Ici, la situation est tout à fait particulière. En raison de l'état incomplet de nos connaissances, nous devons séparer les nombreuses théories des cordes possibles en deux groupes et les explorer l'un après l'autre. Le premier groupe comporte les théories des cordes dont on sait qu'elles existent, et le second groupe comporte toutes celles qui ont été conjecturées, mais pas encore construites.

Grâce aux observations récentes prouvant que l'expansion de notre univers s'accélère, nous sommes obligés de nous concentrer sur le second groupe, car ces théories sont les seules qui s'accordent à ces découvertes. Mais nous ne savons pas comment on pourrait calculer, dans le cadre de ces théories, les probabilités pour que les cordes se déplacent et interagissent. Nous ne sommes pas capables, non plus, de démontrer que ces théories existent ; les seules indications dont nous disposons suggèrent que leurs fonds satisfont à des conditions nécessaires, mais pas suffisantes, pour qu'elles existent. Par conséquent, même dans le meilleur des cas, s'il existe une théorie des cordes qui décrit notre univers, de nouvelles techniques doivent encore voir le jour pour qu'on puisse calculer les prédictions expérimentales dictées par ces théories. Comme je l'ai dit, les théories des cordes connues sont toutes en désaccord avec les faits observés à propos de notre monde : la majorité a une supersymétrie non brisée ; d'autres prédisent que les fermions et les bosons viennent en couple de masse égale ; et toutes prédisent l'existence (jusqu'à ce jour non observée) de forces nouvelles à portée infinie. Il est difficile d'éviter d'en conclure que, aussi motivée soit-elle, la théorie des cordes n'a pas concrétisé les espoirs que beaucoup mettaient en elle il y a vingt ans.

Pendant son âge d'or, en 1985, l'un des adeptes les plus enthousiastes de la nouvelle théorie révolutionnaire était Daniel Friedan, à l'époque à l'Institut Enrico Fermi de l'Université de Chicago. Voici ce qu'il a écrit dans un article récent :

> La théorie des cordes a échoué en tant que théorie physique à cause de l'existence d'une variété de fonds spatio-temporels possibles... La crise déjà ancienne de la théorie des cordes provient de son échec total à expliquer ou à prédire quelque chose en physique des grandes distances. La théorie des cordes ne peut rien dire de définitif à propos de la physique des grandes distances. La théorie des cordes est incapable de déterminer la dimension, la géométrie, le spectre des particules et les constantes de couplage de

> l'espace-temps macroscopique. La théorie des cordes ne fournit aucune explication précise sur la connaissance actuelle du monde réel et ne sait faire aucune prédiction précise. La fiabilité de la théorie des cordes ne peut pas être évaluée, encore moins établie. La théorie des cordes n'a pas de crédibilité en tant que candidate à une théorie physique[39].

Pourtant, beaucoup de théoriciens des cordes persévèrent. Comment est-il possible que, malgré tous les problèmes dont on vient de parler, tant de gens brillants continuent à travailler sur cette théorie ?

Une explication est que les théoriciens des cordes sont passionnés par cette théorie car il la trouve belle ou « élégante ». C'est un jugement esthétique qui donne lieu à beaucoup de controverses parmi les scientifiques, et je ne suis pas sûr de savoir comment l'évaluer. Dans tous les cas, cela ne joue aucun rôle dans l'évaluation objective des réussites de la théorie. Comme on l'a vu dans la première partie du livre, beaucoup de théories très élégantes révélèrent finalement ne rien avoir en commun avec la nature.

Selon quelques jeunes théoriciens des cordes, même si cette théorie échoue en tant qu'unification ultime, elle aura des retombées qui nous aideront à comprendre les autres théories physiques. Ils se réfèrent, en particulier, à la conjecture de Maldacena, discutée au chapitre 9, qui offre une voie d'étude pour certaines théories de jauge grâce à des calculs simples dans la théorie de la gravité correspondante. Cela marche sans doute assez bien pour les théories avec supersymétrie, mais si on veut que cela soit signifiant pour le modèle standard, il faudrait que cette technique marche aussi pour les théories de jauge qui n'ont pas de supersymétrie. Dans ce dernier cas, il existe d'autres techniques et la question se pose de savoir si la conjecture de Maldacena peut mener une vie de couple paisible avec ces dernières. Aucun juge n'a encore prononcé le divorce. Une version simplifiée de la théorie de jauge, où il n'y a que deux dimensions spatiales, reste un bon test pour la durabilité de cette relation, réalisé récemment en utilisant une technique qui n'a rien à voir ni avec la supersymétrie, ni avec la théorie des cordes[40]. On peut aussi l'étudier à travers une troisième approche : la force brute du calcul sur ordinateur. Les calculs sur l'ordinateur sont considérés comme fiables, et, par conséquent, ils servent de critère pour comparer les prédictions des différentes approches. Une telle comparaison montre que la conjecture de Maldacena ne marche pas aussi bien que les autres techniques[41].

Certains théoriciens parient aussi sur des avancées potentielles en mathématiques pour poursuivre le travail sur la théorie des cordes. Une de ces avancées potentielles concerne la géométrie des espaces à six dimensions que les théoriciens des cordes étudient en tant qu'exemple possible des dimensions compactifiées. Dans certains cas, des propriétés inattendues et surprenantes de ces géométries à six dimensions ont été prédites à l'aide des mathématiques de la théorie des cordes. Ces résultats sont bienvenus, mais il faut être clair sur ce qui s'est réellement produit. Il n'y a pas eu de contact avec la physique. Les avancées qui ont eu lieu appartiennent purement au plan mathématique : la théorie des cordes a suggéré quelques conjectures qui établissent des liens entre des structures mathématiques variées. Puis, la théorie des cordes a suggéré que les propriétés des géométries en six dimensions pourraient être exprimées comme des structures mathématiques plus simples,

que l'on peut exprimer sur les surfaces bidimensionnelles que décrivent les cordes dans le temps. Le nom de cette théorie est « théorie conforme ». Il a été suggéré, plus précisément, que les propriétés de certains espaces à six dimensions sont des copies conformes des structures qui existent au sein de ces théories conformes des champs. Ceci a mené à des relations surprenantes entre les couples des espaces à six dimensions. Le résultat est un avantage inattendu et *merveilleux* de la théorie des cordes. Pour qu'il soit utile, il n'est pas nécessaire de croire que la théorie des cordes est la théorie de la nature. Heureusement pour les chercheurs, la théorie conforme des champs joue un rôle important dans beaucoup d'applications différentes, y compris la physique de la matière condensée et la gravité quantique à boucles. Par conséquent, elle n'a rien d'unique qui pourrait l'attacher exclusivement à la théorie des cordes.

Il y a d'autres cas où la théorie des cordes a conduit à des découvertes en mathématiques. Dans un exemple très élégant, un modèle-jouet de la théorie des cordes, appelé « théorie topologique des cordes », a conduit à des percées nouvelles et surprenantes en topologie des espaces à dimensions supérieures. Pourtant, ceci ne constitue pas, en soi, une preuve que la théorie des cordes soit la vraie théorie de la nature, car les théories topologiques des cordes sont des versions simplifiées de la théorie des cordes et elles n'unifient pas les forces et les particules observées dans la nature.

Plus généralement, le fait qu'une théorie physique inspire des développements en mathématiques ne peut pas être utilisé en tant qu'argument pour valider la théorie en tant que théorie physique. Des théories fausses ont inspiré de nombreux développements mathématiques. La théorie des épicycles de Ptolémée aurait pu inspirer les développements en trigonométrie et en théorie des nombres, mais cela ne la rend pas vraie pour autant. La physique newtonienne a inspiré le développement de parties majeures des mathématiques, et elle continue de le faire, mais cela ne l'a pas sauvée lorsqu'elle s'est trouvée en désaccord avec l'expérience. Il existe beaucoup d'exemples de théories fondées sur des mathématiques très élégantes, qui n'eurent jamais aucun succès, auxquelles personne n'a jamais cru. Parmi elles, la première théorie des orbites planétaires de Kepler. Par conséquent, le fait qu'un programme de recherche produise quelques conjectures mathématiques élégantes ne peut suffire à sauver une théorie qui n'a pas clairement articulé ses principes et qui ne fait pas de prédictions physiques.

Les problèmes auxquels se heurte la théorie des cordes ont leurs racines dans l'origine même de l'entreprise d'unification. Dans la première partie de ce livre, j'ai identifié les obstacles qui ont tracassé les précédentes théories unifiées – et ces obstacles les ont menées à l'échec. Certaines d'entre elles comprenaient des tentatives d'unifier le monde en introduisant des dimensions supérieures. La géométrie des dimensions supérieures s'est révélée être tout sauf unique et stable. La raison principale, vue aux chapitres précédents, est que l'unification a toujours des conséquences impliquant des phénomènes nouveaux. Dans les cas réussis – l'électromagnétisme de Maxwell, la théorie électrofaible de Weinberg et Salam, la relativité restreinte et la relativité générale – ces phénomènes nouveaux furent rapidement découverts. Ce sont les rares cas où l'on peut célébrer l'unification. Dans les autres tentatives d'unification, on ne trouve pas rapidement de phénomènes nouveaux, ou bien

on trouve vite un désaccord avec l'observation. Au lieu de célébrer les conséquences de l'unification, le théoricien n'a plus qu'à exercer toute son intelligence pour les cacher. Je ne connais aucun cas où une telle dissimulation des conséquences a mené, au bout du compte, à une théorie réussie ; tôt ou tard, la tentative d'unification a toujours été abandonnée.

La supersymétrie et les dimensions supérieures furent, toutes les deux, des cas où d'énormes efforts ont été consentis pour cacher les conséquences des unifications proposées. Aucune paire de particules connues n'est reliée par la supersymétrie ; au contraire, chaque particule connue a un superpartenaire inconnu, et on est obligé de pratiquer systématiquement le réglage fin des nombreux paramètres de ces théories pour garder hors de vue les particules non observées. Dans le cas des dimensions supérieures, quasiment toutes les solutions de la théorie sont en désaccord avec les observations. Les quelques rares solutions qui, en effet, pourraient ressembler à notre monde, sont des îlots instables dans un vaste océan de possibilités, dont presque toutes nous paraissent totalement étrangères[42].

La théorie des cordes peut-elle éviter les problèmes qui échurent aux précédentes théories supersymétriques et à dimensions supérieures ? C'est peu probable, car on a beaucoup plus de choses à cacher avec la théorie des cordes qu'avec les théories de Kaluza-Klein ou les théories supersymétriques. Le mécanisme proposé par le groupe stanfordien pour stabiliser les dimensions supérieures pourrait marcher, mais le prix est élevé, et il mène à une expansion très importante du paysage des solutions conjecturées. Par conséquent, le prix à payer pour éviter les problèmes qui ont condamné la théorie de Kaluza-Klein est, au mieux, d'adhérer au point de vue d'abord rejeté par les théoriciens des cordes et qui consiste à prendre au sérieux, à parts égales, le grand nombre de théories des cordes candidates à une description potentielle de la nature. Cela signifie renoncer à l'espoir d'une unification unique et, par conséquent, à l'espoir de trouver des prédictions falsifiables en physique des particules élémentaires.

Au chapitre 11, j'ai présenté les affirmations de Susskind, Weinberg et les autres selon lesquelles le paysage des théories des cordes serait, peut-être, la voie de l'avenir de la physique. J'ai montré en quoi ces affirmations ne m'ont pas convaincu. Mais, si tel est le cas, où va la physique ? Dans un entretien récent, Susskind affirme que les enjeux sont d'accepter le paysage des théories et la dilution de la méthode scientifique que cela implique, ou bien de renoncer totalement à la science et d'accepter le dessein intelligent (ID) en tant qu'explication des choix des paramètres du modèle standard :

> Si pour une raison imprévue le paysage s'avère incohérent – peut-être pour des raisons mathématiques, ou parce qu'il est en désaccord avec l'observation –, alors je suis à peu près certain que les physiciens continueront à chercher les explications naturelles du monde. Mais je dois dire que, si cela se produit, étant donné notre connaissance actuelle, nous sommes dans une position très gênante. Sans aucune explication des réglages fins dans la nature, nous aurons du mal à répondre aux adeptes du ID. On pourrait dire que l'espoir qu'une solution mathématique unique voie le jour est autant fondé sur la foi que l'est l'ID[43].

Mais ceci est un faux choix. On verra bientôt qu'il existe d'autres théories qui offrent des explications naturelles aux cinq grandes questions, et celles-ci sont en pleine expansion. Renoncer à la théorie des cordes ne signifie pas renoncer à la science, mais seulement renoncer à une direction de la recherche, qui a jadis connu de grands jours mais qui n'a pas comblé nos espoirs, afin de tourner notre attention dans d'autres directions qui, à ce jour, ont plus de chance d'aboutir.

La théorie des cordes a néanmoins prouvé suffisamment de choses pour qu'il ne soit pas insensé d'espérer que certaines de ces parties, ou peut-être quelque chose qui lui ressemble, pourraient constituer une future théorie.

Mais il existe aussi des preuves irrévocables que quelque chose s'est engagé sur une mauvaise voie. Il est clair, depuis les années 1930, que la théorie quantique de la gravitation doit être indépendante du fond, mais il n'y a eu, à ce jour, que peu de progrès dans la formulation d'une telle théorie des cordes qui pourrait décrire la nature. Cependant, la recherche de la théorie de la nature unique et unifiée a mené à la conjecture d'un nombre infini de théories, dont aucune ne peut être décrite en détail. Si elles étaient cohérentes, elles mèneraient à un nombre infini d'univers possibles. Par-dessus tout cela, on découvre que toutes les versions que l'on peut étudier en détail, sont en désaccord avec l'observation. Malgré l'existence d'un certain nombre de conjectures très tentantes, nous n'avons aucune preuve que la théorie des cordes puisse résoudre quelques-uns des grands problèmes de la physique théorique. Ceux qui croient aux conjectures et ceux de qui seules des preuves réelles entraînent l'adhésion à une théorie se trouvent dans un univers intellectuel très différent. Qu'une telle divergence d'opinions persiste dans un domaine légitime de recherche est, en soi, un indice que quelque chose ne va plus du tout.

La théorie des cordes mérite-t-elle donc encore d'être étudiée, ou bien ne reste-t-il qu'à la déclarer caduque, comme le suggèrent certains ? Beaucoup de nos espoirs ont été déçus et plusieurs conjectures centrales de la théorie restent sans preuve ; ce sont peut-être des raisons suffisantes pour ceux qui décident de renoncer à travailler sur cette théorie. Mais ce ne sont pas de bonnes raisons pour arrêter toute la recherche.

Que se passera-t-il si quelqu'un trouve une façon de formuler la théorie des cordes de telle sorte qu'elle mène sans équivoque au modèle standard de la physique des particules, qu'elle soit indépendante du fond et qu'elle prenne place dans le monde tridimensionnel et sans supersymétrie que nous connaissons ? Même si la probabilité que pareille chose se produise est mince, c'est toujours une possibilité – qui prouve, avec sagesse, que la diversité des programmes de recherche est une chose saine pour la science ; on reviendra sur ce point.

Par conséquent, la théorie des cordes est, sans doute, une des directions de la recherche qui mérite d'être explorée plus avant. Faut-il pour autant continuer à la considérer comme le paradigme dominant de la physique théorique ? Faut-il continuer de lui verser la plupart des ressources allouées à la recherche sur les grands problèmes de physique théorique ? Faut-il laisser sans-le-sou les autres domaines tout en finançant sans compter la théorie des cordes ? Faut-il que seuls les théoriciens des cordes soient éligibles aux postes les plus prestigieux et aux bourses de recherche, comme c'est le cas aujourd'hui ? Je crois que la répon-

se à toutes ces questions doit être un non très clair. La théorie des cordes n'a pas suffisamment réussi, à quelque niveau que ce soit, pour pouvoir justifier qu'on mette tous nos œufs dans son seul panier.

Alors que faire s'il n'y a pas d'autres approches à explorer ? Certains théoriciens des cordes ont affirmé qu'il fallait soutenir la théorie des cordes parce que celle-ci était la seule qui vaille. Je dirais que, même si c'était le cas, on aurait dû encourager avec force les physiciens et les mathématiciens à explorer des approches alternatives. Puisque nous n'avons plus d'espoir que la théorie des cordes, à court terme, fasse des prédictions falsifiables, il n'y a aucune urgence. Encourageons donc les physiciens à chercher une autre voie, plus rapide, vers la réponse aux cinq grands problèmes de la physique théorique.

En réalité, d'autres approches existent. On a découvert d'autres théories et d'autres programmes de recherche, qui visent à résoudre ces cinq problèmes. Lorsque la plupart des théoriciens se concentraient sur la théorie des cordes, quelques chercheurs ont accompli de remarquables progrès dans l'élaboration de ces programmes. Plus important encore, cela fournit des nouvelles prédictions, non anticipées par la théorie des cordes, qui, si elles sont vérifiées, conduiront la physique dans de nouvelles directions. Ces développements théoriques et expérimentaux sont le thème de la prochaine partie de ce livre.

III

Au-delà de la théorie des cordes

13
Les surprises du monde réel

Le philosophe grec Héraclite a laissé une épigramme formidable : « La nature aime à se cacher. » C'est souvent vrai. Héraclite ne pouvait, d'aucune manière, voir un atome. En dépit de ce que lui et ses amis philosophes ont affirmé à propos des atomes, les observer allait bien au-delà des capacités techniques qu'ils pouvaient imaginer. Aujourd'hui, les théoriciens savent tirer profit de cette tendance de la nature à se cacher. Si celle-ci est réellement supersymétrique ou si elle a plus de trois dimensions spatiales, elle les a donc cachées aussi.

Mais parfois le contraire est vrai. De temps en temps, les phénomènes décisifs se trouvent juste en face de nous, prêts à être découverts. Des faits que l'on considère aujourd'hui comme des évidences ne se cachaient de la vision d'Héraclite nulle part ailleurs que dans sa ligne de mire ; il en est ainsi, par exemple, du principe d'inertie ou de la constance de l'accélération des objets en chute. Les observations de Galilée du mouvement de la Terre n'ont utilisé ni télescope, ni horloge mécanique. Autant que je sache, elles auraient pu être faites à l'époque d'Héraclite. Il n'avait qu'à poser les bonnes questions.

En conséquence, lorsqu'on se plaint des difficultés de tester les hypothèses sur lesquels est fondée la théorie des cordes, on doit en même temps s'interroger sur ce qui se cache nulle part ailleurs que dans sa ligne de mire, autour de nous. Dans l'histoire des sciences, il y a plusieurs exemples de découvertes qui surprirent les scientifiques parce que la théorie ne les avait pas anticipées. Y a-t-il aujourd'hui des observations que nous, théoriciens, n'avons pas cherchées et qu'aucune théorie n'incite à faire – des observations qui pourraient mener la physique dans une direction intéressante ? Y a-t-il une chance pour que des observations pareilles aient été faites, mais aient été ignorées parce que, si elles avaient été confirmées, elles auraient mis à mal nos théories actuelles ?

La réponse à cette question est oui. Il existe quelques découvertes expérimentales récentes qui pourraient être des signes de nouveaux phénomènes non prévus par la plupart des théoriciens des cordes et des physiciens des particules. Aucune n'est entièrement établie. Dans certains cas, les résultats sont fiables, mais leur interprétation discutée ; dans d'autres, les résultats sont trop récents et trop surprenants pour être largement acceptés[1]. Ils méritent cependant d'être décrits ici car, si au moins une des indications qu'ils donnent

s'avère être une découverte véritable, alors des caractéristiques importantes de la physique fondamentale n'auront été prédites par aucune des versions de la théorie des cordes, et il sera difficile de les réconcilier avec celle-ci. Les autres approches deviendront donc essentielles et non plus des options secondaires par rapport à la théorie des cordes.

Commençons par la constante cosmologique, dont on pense qu'elle représente l'énergie noire responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers. Comme je l'ai dit au chapitre 10, cette énergie n'a pas été anticipée par la théorie des cordes, ni par la majorité des autres théories, et nous n'avons pas la moindre idée de sa valeur. Nombreux sont les chercheurs qui ont réfléchi à cette question des années durant et qui n'ont presque pas avancé. Je n'ai pas, moi non plus, de réponse, mais j'ai une idée de la façon dont nous pourrions procéder. Arrêtons d'essayer de déduire la valeur de la constante cosmologique au sein de la physique connue. S'il n'existe aucun moyen de tenir compte d'un phénomène grâce à ce que l'on connaît, c'est peut-être le signe qu'on doit chercher quelque chose de nouveau. Peut-être la constante cosmologique est-elle un symptôme de cette chose différente, auquel cas, elle a peut-être d'autres manifestations. Comment faut-il procéder pour les chercher ? Comment les reconnaître ?

La réponse à ces questions sera simple, car les phénomènes universels le sont eux aussi. Les forces en physique sont caractérisées par quelques nombres seulement : par exemple, une distance qui décrit le rayon d'action de la force et une charge pour décrire sa puissance. La constante cosmologique, elle, est caractérisée par une échelle, l'échelle de la distance à laquelle elle courbe l'univers. Appelons cette échelle R. Sa valeur est d'environ 10 milliards d'années-lumière, ou 10^{27} centimètres[2]. Ce qui est bizarre concernant la constante cosmologique, c'est que son échelle est énorme comparée aux autres échelles en physique. L'échelle R est 10^{40} fois plus grande qu'un noyau d'atome et 10^{60} fois plus grande que l'échelle de Planck (qui est la longueur quantique, environ 10^{20} fois inférieure à la taille du proton). Par conséquent, il est logique de se demander si l'échelle R pourrait révéler une physique complètement nouvelle. Une bonne approche à cette question serait de chercher des phénomènes se produisant à la même échelle gigantesque.

Se passe-t-il d'autres choses à l'échelle de la constante cosmologique ? Commençons par la cosmologie elle-même. Les observations les plus précises que nous avons en cosmologie sont les mesures du fond diffus cosmologique. Ce phénomène est un rayonnement laissé par le Big Bang, qui arrive vers nous depuis toutes les directions du ciel. Il est purement thermique – c'est-à-dire, aléatoire. Il s'est refroidi au fur et à mesure de l'expansion de l'univers et a maintenant la température de 2,7 degrés Kelvin. Cette température est uniforme partout dans le ciel à un très haut degré de précision mais, au niveau de quelques parties sur cent mille, il existe des fluctuations (voir figure 13 en haut). Le motif de ces fluctuations nous fournit des indications importantes concernant la physique du tout début de l'univers.

Depuis quelques dizaines d'années, les satellites, les détecteurs placés sur des ballons et ceux posés à la surface de la Terre nous ont fourni des cartes des fluctuations de la température du fond diffus. Une façon de comprendre ce qui est mesuré dans ces expériences est d'imaginer les fluctuations comme des ondes sonores dans l'univers naissant. Il est ensuite

utile de se demander quel est le volume sonore de ces fluctuations à différentes longueurs d'onde. Le résultat fournit une image, comme celle du bas de la figure 13, qui nous donne la quantité d'énergie à des longueurs d'onde diverses.

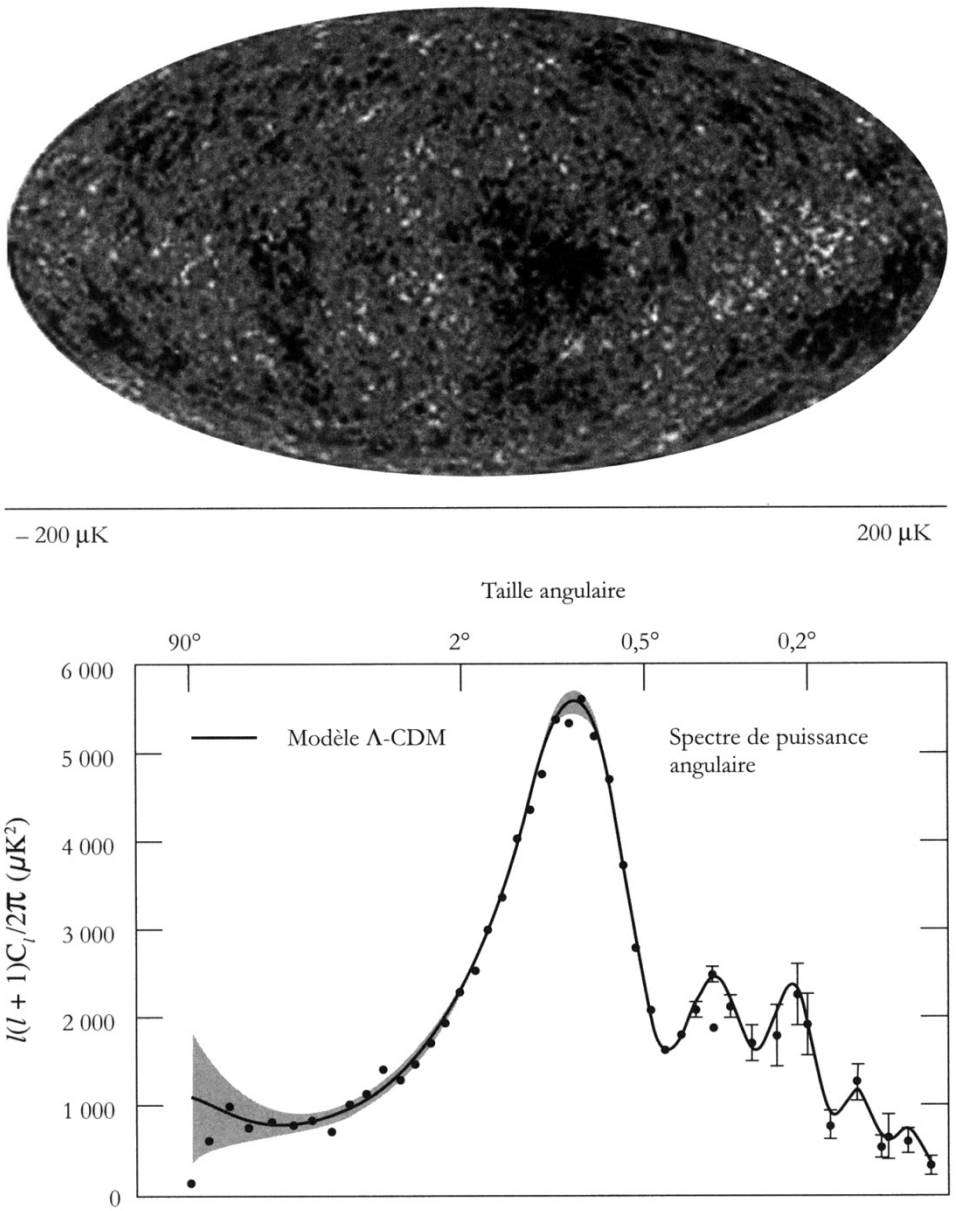


Figure 13. En haut : le ciel vu aux fréquences micro-ondes. Le signal correspondant à notre galaxie a été supprimé, laissant une image de l'Univers tel qu'il était lorsqu'il fut suffisamment froid pour permettre aux protons et aux électrons de se rassembler et ainsi créer de l'hydrogène. En bas : la distribution de l'énergie de l'image du haut à différentes longueurs d'ondes. Les points représentent les données du WMAP et d'autres observations. La courbe représente les prédictions du modèle standard cosmologique.

Cette image est dominée par un large sommet, suivi de quelques cimes plus petites. Leur découverte est l'un des triomphes de la science contemporaine. Les cosmologues les

interprètent comme des indications du fait que la matière, qui remplissait l'univers naissant, était en résonance, un peu comme le corps d'un tambour ou d'une flûte. La longueur d'onde à laquelle vibre un instrument musical est proportionnelle à sa taille ; la même chose est vraie de l'Univers. Les longueurs d'ondes des modes résonnants nous disent quelle était sa taille quand il devint, pour la première fois, transparent : c'est-à-dire, quand le plasma chaud initial s'est transformé, ou s'est « découplé », en royaumes séparés, matière et énergie, quelque trois cent mille ans après le Big Bang, au moment où le fond diffus devint visible. Ces observations sont extrêmement utiles car elles précisent les limites des valeurs des paramètres de nos modèles cosmologiques.

Un autre trait que nous observons dans ces données est qu'il existe très peu d'énergie à la longueur d'onde la plus grande. C'est peut-être une simple fluctuation statistique, conséquence du petit nombre de données. Mais si ce n'était pas le cas, on pourrait l'interpréter comme une coupure au-dessus de laquelle les modes sont beaucoup moins excités. Il est intéressant de noter que cette coupure se situe à l'échelle R, associée à la constante cosmologique.

L'existence d'une telle coupure serait énigmatique du point de vue de la théorie du début de l'Univers la plus largement acceptée, qui s'appelle « inflation ». Selon cette théorie, l'Univers s'est étendu exponentiellement vite à une période extrêmement ancienne. L'inflation explique la quasi-uniformité du fond diffus, en s'assurant que toutes les parties de l'univers que nous voyons aujourd'hui auraient pu se trouver en contact fortuit lorsque l'univers était encore à l'état de plasma.

La théorie prédit également des fluctuations dans le fond diffus cosmologique, dont on pense qu'elles sont des résidus des effets quantiques, en action pendant la période d'inflation. Le principe d'incertitude implique que les champs qui constituaient l'énergie de l'univers pendant l'inflation, fluctuaient, et que ses fluctuations se sont imprimées sur la géométrie de l'espace en y laissant des traces. Dans l'univers en expansion exponentielle, ces traces persistent, produisant des fluctuations de la température du rayonnement formé quand l'univers devint transparent.

On pense que l'inflation a donné naissance à une région énorme de l'univers avec des propriétés relativement uniformes. On pense que cette région est plus vaste de plusieurs ordres de grandeur que la région observable, à cause d'un argument simple à propos des échelles. Si l'inflation s'est arrêtée juste à l'instant où elle a créé une région aussi grande que celle que nous observons, alors il doit y avoir un paramètre caché dans la physique de l'inflation qui a déterminé cet instant particulier comme point d'arrêt ; il s'avère que cet instant n'est rien d'autre que le moment présent. Cela paraît improbable, car l'inflation a eu lieu quand l'univers avait une température entre dix et vingt ordres de grandeur supérieure à celle du centre de l'étoile la plus chaude aujourd'hui ; les lois qui la gouvernaient dans ces conditions extrêmes devaient donc être différentes des lois actuelles. Il existe de nombreuses hypothèses concernant les lois qui régissent l'inflation, aucune ne prédisant quoi que ce soit à l'échelle temporelle de dix milliards d'années. Une autre façon de le dire est d'affirmer qu'il n'existe aucune possibilité pour que la valeur présente de la constante cosmologique ait quelque chose en commun avec la physique qui causa l'inflation.

Ainsi, si l'inflation a produit un univers uniforme à l'échelle où nous l'observons, il est probable qu'elle ait produit un univers uniforme à une échelle beaucoup plus grande. Ceci implique, à son tour, que les motifs des fluctuations causées par l'inflation doivent rester les mêmes quelle que soit la profondeur de notre regard expérimental. Si l'on pouvait regarder au-delà de la limite actuelle de l'univers observable, on devrait toujours constater de petites fluctuations dans le fond diffus cosmologique. Au lieu de cela, l'expérience montre que les fluctuations cessent au-dessus de l'échelle *R*.

En effet, lorsque les cosmologues ont examiné les modes à grande longueur d'onde dans le fond diffus, ils se sont heurtés à un mystère encore plus épais. C'est une conviction commune des cosmologues que les modes supérieurs doivent être symétriques, c'est-à-dire que toute direction doit être équivalente à toute autre. Ceci ne correspond pas à ce qu'on observe. Le rayonnement dans ces modes supérieurs n'est pas symétrique ; il existe une direction privilégiée. (Les cosmologues Kate Land et João Magueijo l'ont appelée « axe du mal[3] ».) Personne ne peut l'expliquer rationnellement.

Ces observations sont controversées, puisqu'elles contredisent nos attentes fondées sur la théorie de l'inflation. L'inflation répondant à un grand nombre de questions en cosmologie, beaucoup de scientifiques pensent, par conséquent, qu'il doit y avoir une erreur dans les données concernant le fond diffus. En effet, on ne peut jamais exclure que les mesures soient simplement mauvaises. Les données brutes sont soumises à un grand nombre d'analyses délicates avant d'être présentées au public. Une de ces analyses consiste à soustraire aux données initiales le rayonnement issu de la galaxie où nous vivons. Il est possible que cette soustraction contienne une erreur mais les experts, assez peu nombreux, qui connaissent la procédure d'analyse des données ne croient pas que ce soit le cas ici. Une autre possibilité, comme je l'ai déjà dit, est que nos observations ne soient que des anomalies statistiques. Une oscillation à la longueur d'onde de l'échelle *R* occupe une très grande partie du ciel – autour de 60 degrés ; par conséquent, on ne voit que quelques longueurs d'onde, et il n'existe que peu d'éléments de données, auquel cas il n'est pas impossible que ce qu'on observe ne soit que des fluctuations statistiques aléatoires. Selon une estimation, la probabilité que les preuves de la direction privilégiée ne soient qu'une anomalie statistique est toutefois inférieure à une chance sur mille[4]. Il est peut-être plus facile de croire en cette improbable malchance plutôt que les prédictions de l'inflation ne se réalisent pas.

À ce jour, telles sont les questions sans réponse. Pour l'instant, il suffit de savoir qu'on a cherché une physique bizarre à l'échelle *R* et qu'on l'a effectivement trouvée.

Y a-t-il d'autres phénomènes associés à cette échelle ? On peut combiner *R* avec les autres constantes de la nature pour voir ce qui en sortira aux échelles définies par les résultats de ces combinaisons. Voici un exemple. Considérez *R* divisée par la vitesse de la lumière : R/c. Cela donne un temps, et ce temps correspond à peu près à l'âge actuel de l'univers. L'inverse, c/R, donne une fréquence – un ton *très* bas, une seule oscillation par temps de vie de l'univers.

Essayons ensuite une autre combinaison simple, c^2/R. Cette grandeur est une accélération. C'est même l'accélération à laquelle croît le taux d'expansion de l'univers – c'est-à-dire l'accélération produite par la constante cosmologique. Pourtant, comparée aux échel-

les ordinaires, elle est minuscule : 10^{-8} centimètres par seconde par seconde. Imaginez un insecte qui rampe sur le sol. Il fait, au mieux, 10 centimètres par seconde. Si l'insecte double sa vitesse, étalant l'accélération sur le temps de vie d'un chien, alors son accélération sera environ c^2/R. Effectivement, une très petite valeur d'accélération !

Mais supposez qu'il existe un nouveau phénomène universel qui explique la valeur de la constante cosmologique. Uniquement grâce au fait que les échelles coïncident, ce nouveau phénomène devrait aussi influencer tout autre mouvement dont l'accélération est aussi petite. Par conséquent, chaque fois qu'on observe quelque chose qui bouge avec cette accélération minuscule, on devrait s'attendre à voir quelque chose de nouveau. Maintenant un jeu intéressant commence. On connaît bien des choses qui accélèrent à un taux très bas, parmi elle une étoile standard sur son orbite dans une galaxie standard. En fait, une galaxie sur son orbite autour d'une autre galaxie accélère encore plus lentement. Or voit-on quelque chose de différent dans le cas des orbites d'étoiles dont l'accélération est très petite en comparaison des étoiles dont l'accélération est plus grande ? La réponse est oui, et de façon vraiment spectaculaire. C'est le problème de la matière noire.

Comme je l'ai dit au premier chapitre, les astronomes ont découvert le problème de la matière noire en mesurant l'accélération des étoiles qui orbitent autour des centres de leurs galaxies. Ce problème s'est posé, car, étant donné les accélérations mesurées, les astronomes pouvaient en déduire la distribution de la matière dans la galaxie. Dans la plupart des galaxies, ce résultat est en désaccord avec la matière observée directement.

Je peux maintenant en dire un peu plus sur le lieu où apparaît cette divergence. (Pour simplifier, je réduirai la discussion aux galaxies spirales, où la plupart des étoiles tournent sur les orbites circulaires autour d'un disque.) Dans chacune des galaxies où l'on a rencontré le problème, celui-ci affecte seulement les étoiles dont le mouvement s'effectue au-delà d'une certaine orbite. À l'intérieur de cette orbite, il n'y a pas de problème : l'accélération est ce qu'elle devrait être si elle était produite par la matière visible seule. Par conséquent, il semble qu'il existe une région à l'intérieur de la galaxie où les lois de Newton sont validées et où il n'y a pas besoin de matière noire. Au-delà de cette région, les choses se compliquent.

La question centrale qui se pose est la suivante : où se trouve cette orbite particulière qui sépare les deux régions ? On peut supposer qu'elle apparaît à une distance particulière à partir du centre de la galaxie. C'est une hypothèse naturelle, mais fausse. La ligne de séparation passe-t-elle à une certaine densité des étoiles ou de leur lumière ? Une fois encore, la réponse est non. Il semble que ce qui détermine la ligne de séparation, de façon étonnante, n'est rien d'autre que le taux d'accélération lui-même. Lorsqu'on s'éloigne du centre de la galaxie, l'accélération décroît, et un taux critique se révèle, qui marque la fin d'applicabilité des lois de la gravitation de Newton. Lorsque l'accélération des étoiles dépasse la valeur critique, la loi de Newton marche, et l'accélération qu'elle prédit est observée. Dans ce cas, il n'existe aucun besoin de postuler l'existence de la matière noire. Mais lorsque l'accélération observée est plus petite que la valeur critique, elle ne s'accorde plus avec la prédiction de la loi newtonienne.

Quelle est cette accélération spéciale ? On l'a mesurée. Elle est égale à 1,2 x 10^{-8} centimètres par seconde par seconde. C'est proche de c^2/R, c'est-à-dire de la valeur de l'accélération produite par la constante cosmologique !

Ce tournant remarquable dans l'histoire de la matière noire a été introduit par un physicien israélien du nom de Mordehai Milgrom au début des années 1980. Sa découverte fut publiée en 1983 et pendant plusieurs années elle fut presque totalement ignorées[5]. Pourtant, les données empiriques s'améliorant, il est devenu clair que son observation était correcte. L'échelle c^2/R caractérise le lieu où, pour les galaxies, la loi de Newton ne s'applique plus. Les astronomes l'appellent désormais « loi de Milgrom ».

Je me permets d'insister sur le fait que cette observation est vraiment bizarre. L'échelle R est une échelle de tout l'univers observable, qui est infiniment plus grand que n'importe quelle galaxie individuelle. C'est à cette échelle cosmologique qu'advient l'accélération c^2/R ; comme nous l'avons vu, il s'agit du taux auquel s'accélère l'expansion de l'univers. Il n'existe aucune raison pour que cette échelle joue un rôle quelconque dans la dynamique d'une galaxie individuelle. Pourtant, ce fait empirique nous a été imposé par les données. Je me rappelle de ma stupéfaction quand j'en ai entendu parler pour la première fois. Je fus choqué, mais cela m'a donné de l'énergie. Ahuri, je me suis promené ça et là pendant une heure en marmonnant des obscénités incohérentes. Enfin ! L'indication expérimentale que le monde contient peut-être plus que ce que nous, théoriciens, croyons !

Comment doit-on l'expliquer ? Cela pourrait être une simple coïncidence. Si ça ne l'est pas, il existe deux possibilités. La première : il pourrait y avoir de la matière noire, et l'échelle c^2/R pourrait caractériser la physique des particules de la matière noire. Si c'est vrai, alors il existe un lien entre la matière noire et la constante cosmologique. La matière noire et l'énergie noire sont toujours des phénomènes distincts, mais apparentés.

L'autre possibilité est qu'il n'y a pas de matière noire et que la loi newtonienne de la gravitation cesse de s'appliquer là où les accélérations deviennent aussi petites que la valeur particulière de c^2/R. Dans ce cas, il doit y avoir une loi nouvelle qui remplace la loi de Newton dans ces circonstances. Dans son article de 1983, Milgrom a proposé une théorie de ce genre. Il l'a appelée MOND pour *Modified Newtonian Dynamics*. Selon la loi de la gravitation de Newton, l'accélération d'une masse sur un corps décroît d'une façon particulière lorsqu'on s'éloigne de cette masse – elle décroît proportionnellement au carré de la distance. La théorie de Milgrom pose que la loi de Newton n'est plus correcte lorsque l'accélération devient inférieure à la valeur magique de 1,2 x 10^{-8} centimètres par seconde par seconde. Passé ce point, au lieu de décroître comme le carré de la distance, elle décroît comme la distance. De plus, tandis que la loi newtonienne est proportionnelle à la masse du corps qui cause l'accélération, multipliée par une constante (la constante gravitationnelle de Newton), MOND prédit que quand l'accélération est très petite, la force est proportionnelle à la racine carrée de la masse multipliée par la constante gravitationnelle de Newton.

Si Milgrom a raison, alors les étoiles accélèrent plus que nécessaire, au-delà d'une orbite particulière, car la force gravitationnelle qui leur est imposée est plus élevée que celle prédite par Newton ! Voilà donc une physique totalement neuve : non pas à l'échelle de

Planck, non pas telle qu'on la réalise dans un accélérateur, mais en face de nous, dans le mouvement des étoiles visibles dans le ciel.

En tant que théorie, MOND n'a pas beaucoup de sens pour les physiciens. Il existe de bonnes raisons à ce que les forces électriques et gravitationnelles décroissent comme le carré de la distance. C'est une conséquence de la relativité, combinée à la nature tridimensionnelle de l'espace. Je ne peux pas ici argumenter plus avant, mais la conclusion est très claire. La théorie de Milgrom paraît inconsistante selon les principes physiques de base, y compris ceux de la relativité restreinte et générale.

Il y a eu quelques tentatives de modifier la relativité générale et construire une théorie qui contiendrait MOND ou quelque chose d'approchant. Une théorie de ce genre a été inventée par Jacob Bekenstein ; une autre, par John Moffat, à l'époque chercheur à l'Université de Toronto ; encore une autre par Philip Mannheim de l'Université du Connecticut. Tous sont dotés d'une très fructueuse imagination (Bekenstein, comme vous pouvez vous le rappeler du chapitre 6, a découvert l'entropie des trous noirs, tandis que Moffat a inventé beaucoup de choses surprenantes, y compris une cosmologie à vitesse variable de la lumière). Leurs trois théories marchent dans une certaine mesure, mais elles sont toutes, à mon goût, très artificielles. Elles possèdent quelques champs supplémentaires et demandent qu'on ajuste quelques constantes à des valeurs peu plausibles, afin de s'accorder aux observations. Je m'inquiète aussi des problèmes d'instabilité dans ces théories, quoique leurs auteurs nous assurent que ces problèmes sont résolus. La bonne nouvelle est que les scientifiques peuvent étudier ces théories « à l'ancienne », en comparant les prédictions qu'elles produisent avec l'importante quantité de données astronomiques que l'on possède.

Il faut dire que hors des galaxies, MOND ne fonctionne pas très bien. Il y a beaucoup de données sur la distribution des masses et du mouvement des galaxies à des échelles plus grandes que celle d'une seule galaxie. Dans ce régime, la théorie de la matière noire marche beaucoup mieux que MOND, en ce qu'elle rend réellement compte de ces données.

Néanmoins, MOND paraît fonctionner assez bien à l'intérieur des galaxies[6]. Les données recueillies au cours des dix dernières années ont révélé plus de quatre-vingts cas différents (selon le dernier comptage) sur environ une centaine étudiée, où MOND prédit fidèlement le mouvement des étoiles. En fait, MOND prédit le mouvement des étoiles à l'intérieur des galaxies *mieux* que tous les modèles fondés sur la matière noire. Certes, ceux-ci s'améliorent sans cesse, et je n'ose m'aventurer à prédire l'évolution de ce décalage dans le temps. Quoi qu'il en soit, nous nous trouvons aujourd'hui dans une situation aussi délicieuse qu'épouvantable. Nous avons deux théories très différentes, dont une et une seule peut être vraie. La théorie basée sur la matière noire est tout à fait sensée et facile à croire ; elle est de plus très efficace pour prédire les mouvements à l'extérieur des galaxies, mais moins bien à l'intérieur. L'autre théorie, MOND, marche très bien pour les galaxies, ne marche pas à l'extérieur des galaxies et se fonde sur des présupposés semblant contredire complètement la science établie. Je dois avouer que, au cours de la dernière année, rien ne m'a empêché de dormir plus que ce problème-ci.

Il serait facile de rejeter MOND si la loi de Milgrom ne suggérait pas que l'échelle de la mystérieuse constante cosmologique intervient d'une manière ou d'une autre pour déterminer le mouvement des étoiles dans les galaxies. À en juger seulement par les données, il paraît clair en effet que l'accélération c^2/R joue un rôle crucial dans le mouvement des étoiles. Que ce soit à cause d'un lien profond entre matière noire d'un côté et énergie noire ou échelle d'expansion cosmologique de l'autre, ou encore pour une raison plus radicale, on ne peut qu'en conclure qu'une physique nouvelle doit, en effet, se révéler à nous autour de cette accélération.

J'ai eu des discussions à propos du MOND avec quelques théoriciens les plus imaginatifs que je connaisse. Souvent, cela s'est passé ainsi : nous sommes en train de parler d'un quelconque problème, un de ceux dont tout le monde discute, et l'un de nous mentionne les galaxies. Nous nous regardons alors avec un éclair de reconnaissance dans les yeux et l'un de nous dit : « Alors, tu es aussi inquiet à propos du MOND » – comme s'il était en train d'admettre un vice secret. Ensuite, nous partageons nos idées folles – parce que toutes les idées au sujet du MOND, si elles ne sont pas immédiatement invalidées, ne peuvent qu'être folles.

Notre seul atout ici est que nous possédons un grand nombre de données qui en plus s'améliorent avec le temps. Tôt ou tard, nous saurons si la matière noire explique le mouvement des étoiles dans les galaxies ou si nous devons accepter une modification radicale des lois de la physique.

Certes, il se pourrait que ce ne soit que par accident que la matière noire et l'énergie noire partagent la même échelle énergétique. Toutes les coïncidences n'ont pas forcément un sens. Par conséquent, on doit se demander s'il existe d'autres phénomènes qui pourraient nous permettre de mesurer cette accélération minuscule. Si oui, y a-t-il des situations où la théorie et l'expérience ne seraient pas en accord ?

Il s'avère que oui, et c'est aussi troublant. La NASA a envoyé, à ce jour, un certain nombre de vaisseaux spatiaux au-delà du système solaire. Parmi ces vaisseaux, il a été possible d'en suivre deux – *Pioneer 10* et *Pioneer 11* – pendant des dizaines d'années. Les Pionniers ont été créés pour tourner autour d'autres planètes, mais une fois cette mission accomplie, ils ont continué à s'éloigner du Soleil, dans des directions opposées sur le plan du système solaire.

Les scientifiques du laboratoire JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) à la NASA à Pasadena, en Californie, ont pu déterminer la vitesse des Pionniers en utilisant l'effet Doppler ; ainsi, ils ont suivi de près leurs trajectoires. JPL essaye d'anticiper ces trajectoires en calculant les forces qui agissent sur les deux vaisseaux, venant du Soleil, des planètes et d'autres constituants du système solaire. Dans les deux cas, les trajectoires observées ne coïncident pas avec les prédictions[7]. Les divergences font apparaître une accélération supplémentaire qui tire les deux vaisseaux vers le Soleil. La valeur de cette accélération mystérieuse est d'environ 8×10^{-8} centimètres par seconde par seconde – plus que l'accélération anormale mesurée dans les galaxies par un facteur de l'ordre de 6. Mais cela reste assez proche, étant donné qu'il n'existe apparemment pas de lien entre les deux phénomènes.

Je dois reconnaître que les données, dans ce cas, ne sont pas complètement acceptées. Bien que l'anomalie ait été observée avec les deux Pionniers – ce qui est beaucoup plus convaincant qu'avec un seul –, tous les deux ont été construits et sont suivis par JPL. Pourtant, les données de JPL ont été analysées indépendamment par des scientifiques utilisant le *Compact High Accuracy Satellite Motion Program* de l'*Aerospace Corporation*, et ces résultats s'accordent avec ceux de JPL. En conséquence, les données ont jusqu'ici passé les tests avec succès. Les astronomes et les physiciens ont cependant des critères très élevés concernant la validité des preuves, et on les comprend, tout particulièrement lorsqu'on leur demande de croire que la loi de gravitation de Newton ne s'applique pas à l'extérieur du système solaire.

Puisque la divergence est faible, on pourrait en rendre compte par un petit effet, comme par exemple le fait que le côté du vaisseau spatial tourné vers le Soleil est un peu plus chaud que le côté opposé, ou peut-être par une minuscule fuite de combustible. Le groupe du JPL a pris en considération tous les effets de ce genre auxquels il a pu penser, mais, à ce jour, il n'a pas réussi à expliquer cette accélération anormale. Récemment, on a proposé d'envoyer une sonde spéciale, qui serait construite de sorte à éliminer autant d'effets secondaires que possible. Il faudrait à cette sonde beaucoup d'années de voyage pour quitter le système solaire mais, même si cela doit prendre du temps, cela mérite d'être réalisé. La loi newtonienne de gravitation tient depuis trois siècles ; quelques années de plus pour la valider ou la falsifier, c'est un prix somme toute modique.

Que se passera-t-il si MOND ou l'anomalie des Pionniers sont correctes ? Peut-on réconcilier ce fait avec les théories existantes ?

Au minimum, on peut dire que MOND est incompatible avec toutes les versions de la théorie des cordes étudiées à ce jour. Pourrait-il être compatible avec une version de la théorie des cordes qu'on ne connaît pas encore ? Oui, bien sûr. Étant donné la flexibilité de la théorie des cordes, il n'y a aucune raison d'exclure cette possibilité, même si cela semble difficile à réaliser. Qu'en est-il concernant les autres théories ? Certains chercheurs ont essayé, avec difficulté, de déduire MOND d'un scénario impliquant un monde à branes ou une version de la gravité quantique. Ils firent des découvertes plutôt intéressantes, mais rien qui fasse réellement impression. Avec Fotini Markopoulou, ma collègue à l'Institut Perimeter de physique théorique, nous avons avancé quelques spéculations sur la manière de déduire MOND de la gravité quantique, mais nous n'avons pas pu montrer en détail que notre concept pouvait fonctionner. MOND est une énigme très tentante, mais à ce jour impossible à résoudre. Passons donc à d'autres indications de la possibilité d'une physique nouvelle, fournies par l'expérimentation.

Les expériences les plus spectaculaires sont celles qui battent en brèche les croyances les plus universelles. Certaines croyances sont si bien implantées dans nos esprits qu'elles sont passées dans le langage courant. Par exemple, on parle de « constantes physiques » pour désigner les nombres qui ne changent jamais. Cela inclut les paramètres les plus fondamentaux des lois de la physique, comme la vitesse de la lumière ou la charge de l'électron. Mais ces constantes sont-elles vraiment constantes ? Pourquoi serait-il impossible que la vitesse de la lumière varie avec le temps ? Et une telle variation pourrait-elle être détectée ?

Selon la théorie du multivers discutée au chapitre 11, on a imaginé des paramètres qui varient à travers un ensemble d'univers différents. Mais comment peut-on observer, dans notre univers à nous, de telles variations ? Les constantes telles que la vitesse de la lumière pourraient-elles varier avec le temps dans notre propre univers ? Certains physiciens ont attiré l'attention sur le fait qu'on mesure la vitesse de la lumière dans un système donné d'unités – à savoir tant de kilomètres par seconde. Ces physiciens se sont demandés si l'on pouvait distinguer les variations dans la vitesse de la lumière des variations où les unités elles-mêmes changent avec le temps.

Pour répondre à cette question, on doit savoir comment les unités de distance et les unités de temps sont définies. Ces unités s'appuient sur un critère physique, exprimé en termes de comportement d'un système particulier. Au début, les critères se référaient à la Terre : un mètre était un dix-millionième de la distance du pôle Nord jusqu'à l'équateur. Maintenant les critères s'appuient sur les propriétés des atomes : par exemple, une seconde est définie en termes de vibrations de l'atome de césium.

Au vu de la façon dont les unités sont définies, les constantes physiques sont donc définies comme des rapports entre certains nombres. Par exemple, la vitesse de la lumière peut être déterminée si l'on connaît le rapport entre le temps que la lumière met pour traverser un atome et la durée de la lumière émise par cet atome. Les rapports de ce type sont les mêmes dans tous les systèmes d'unités. Ils se réfèrent uniquement aux propriétés physiques des atomes ; aucune décision sur le choix des unités n'est faite. Puisque les rapports sont définis uniquement en termes de propriétés physiques, il n'est pas insensé de se demander si ces rapports varient avec le temps. Et si oui, il y a alors aussi une évolution temporelle de la relation des propriétés physiques des atomes entre eux.

Les variations dans ces rapports devraient se mesurer par des changements dans la fréquence de la lumière émise par les atomes. Ceux-ci émettent la lumière dans un spectre qui contient plusieurs fréquences discrètes ; il y a donc plusieurs rapports entre les couples de fréquences. On peut alors se demander si ces rapports sont différents dans le cas de la lumière venant des étoiles et des galaxies éloignées – une lumière vieille de plusieurs milliards d'années.

Les expériences de ce genre n'ont pas réussi à détecter de modifications dans les constantes de la nature au sein de notre galaxie ou des galaxies voisines. Par conséquent, à échelle temporelle de millions d'années, les constantes n'ont pas varié de façon sensible. Mais une expérience en cours, mené par un groupe australien, a trouvé des modifications dans les rapports, en étudiant la lumière qui vient des quasars – une lumière émise il y a environ dix milliards d'années. Les scientifiques australiens n'ont pas étudié les spectres atomiques du quasar lui-même ; ce qu'ils font est plus intelligent. Sur son chemin jusqu'à nous, la lumière du quasar traverse plusieurs galaxies. À chaque fois, une certaine quantité de cette lumière est absorbée par les atomes de cette galaxie. Les atomes absorbent la lumière à des fréquences particulières et connues mais, en raison de l'effet Doppler, les fréquences auxquelles la lumière est absorbée sont déplacées vers l'extrémité rouge du spectre et la quantité du déplacement est proportionnelle à la distance entre nous-mêmes et cette galaxie. Le spectre de la lumière du quasar est donc décoré par une forêt de raies, chacune

correspondant à la lumière absorbée par une galaxie qui se trouve, par rapport à nous, à une distance particulière. En étudiant les rapports des fréquences de ces raies, on peut chercher les variations dans les constantes fondamentales pendant le temps pris par la lumière pour venir du quasar. Puisque les modifications doivent se manifester au niveau des rapports des fréquences, et qu'il existe quelques constantes fondamentales différentes, les physiciens ont choisi d'étudier le rapport le plus simple : la constante de structure fine, dont l'expression comprend les autres constantes déterminant les propriétés de l'atome. On l'appelle *alpha*, et elle est égale au rapport entre la charge de l'électron au carré et la vitesse de la lumière, multiplié par la constante de Planck.

Les Australiens ont étudié les mesures de la lumière venant de quatre-vingts quasars, en utilisant des spectres très précis pris par le télescope Keck sur les îles Hawaï. Ils en ont déduit que, il y a dix milliards d'années, alpha était plus grande qu'aujourd'hui, pour environ une part sur dix mille[8].

C'est une variation faible, mais si elle se confirmait, ce serait une découverte remarquable, la plus importante depuis des décennies : la première indication qu'une constante fondamentale de la nature varie avec le temps.

Plusieurs astronomes restent ouverts à cette proposition. Ils admettent que, suivant les critères les plus élevés, les données ont été recueillies et analysées avec une attention extrême. Personne n'a trouvé d'erreur évidente dans la méthode du groupe australien, ni dans les résultats, mais l'expérience elle-même est très délicate, les précisions qu'elle demande sont à la limite de ce dont nous sommes capables, et on ne peut pas rejeter la possibilité qu'une erreur ait pu se glisser dans les analyses. À l'instant où j'écris ces lignes, la situation est assez compliquée, comme c'est souvent le cas avec une technique expérimentale nouvelle. D'autres groupes essayent de reproduire les mêmes mesures, et les résultats sont controversés[9].

Beaucoup de théoriciens sont cependant sceptiques au sujet de ces indications de variations de la constante de structure fine. Ils pensent qu'une variation pareille serait extrêmement peu naturelle, car elle introduirait une échelle dont l'ordre de grandeur dépasse largement l'échelle de la physique atomique à la théorie des électrons, des noyaux et des atomes. Certes, ils auraient pu dire la même chose à propos de l'échelle de la constante cosmologique. En fait, l'échelle à laquelle varie la constante de structure fine n'est proche d'aucune autre chose déjà mesurée, si ce n'est la constante cosmologique. Il se pourrait donc qu'on ait ici affaire à un autre phénomène mystérieux lié à l'échelle *R*.

Une autre manifestation de l'échelle *R* pourrait venir des masses énigmatiques des neutrinos. On peut convertir *R* à l'échelle des masses en n'utilisant que les constantes fondamentales de la physique, et le résultat est du même ordre de grandeur que les différences entre les masses des différents types de neutrinos. Personne ne sait pourquoi les neutrinos, tout en étant les particules les plus légères, devraient avoir des masses liées à *R*, mais cela est ainsi ; voilà donc une autre indication expérimentale bien tentante.

Finalement, il pourrait exister une indication expérimentale ultime qui inclurait l'échelle *R*. En effet, en la combinant avec la constante gravitationnelle de Newton, nous pouvons déduire la présence probable d'effets qui modifient la force gravitationnelle à

l'échelle du millimètre. Actuellement, un groupe de l'université de Washington sous la direction d'Eric Adelberger est en train de réaliser des mesures ultra-précises de la force de gravité entre deux objets éloignés l'un de l'autre de quelques millimètres. Au jour où j'écris ces lignes (juin 2006), tout ce qu'ils ont été capables d'affirmer publiquement est qu'ils n'ont pas découvert de preuves que les lois de Newton soient fausses, jusqu'à l'échelle de six centièmes de millimètre.

Nos expériences doivent pouvoir tester les principes fondamentaux de la physique. Il existe une tendance à croire que ces principes, une fois découverts, sont éternels ; cependant, l'histoire nous montre que ce n'est pas toujours le cas. Quasiment tous les principes autrefois proclamés éternels furent remplacés par d'autres. Quelles que soient leur utilité et la précision de l'approximation qu'ils fournissent, tôt ou tard la majorité échoue lorsque l'expérience sonde le monde de la nature avec une précision accrue. Platon a affirmé que toute chose sur la sphère céleste était en mouvement circulaire. Il avait de bonnes raisons de le penser : on croyait à l'époque que tout ce qui se trouvait au-dessus de la sphère de la Lune était éternel et parfait, et aucun mouvement n'est plus parfait que le mouvement circulaire uniforme. Ptolémée a utilisé ce principe et l'a amélioré en construisant les épicycles : des cercles eux-mêmes en mouvement autour d'autres cercles.

Les orbites des planètes sont, en effet, très proches des orbites circulaires, et le mouvement des planètes sur leurs orbites est presque uniforme. Il est d'ailleurs peu surprenant que l'orbite la moins circulaire, celle de Mars l'Indiscipliné, soit encore tellement proche d'un cercle que ses déviations sont à la limite de ce qu'on peut déduire des meilleures observations possibles à l'œil nu. En 1609, après neuf ans de travail pénible sur l'orbite de Mars, Johannes Kepler a compris que c'était une ellipse. La même année, Galilée a tourné son télescope vers le ciel et déclencha une nouvelle ère pour l'astronomie, au cours de laquelle il fut finalement prouvé que Kepler avait raison. Les cercles sont les formes les plus parfaites, mais les orbites planétaires ne sont pas circulaires.

Lorsque les anciens parlaient du cercle comme de la forme la plus parfaite, ils entendaient par là qu'il est le plus symétrique : tout point de l'orbite est alors exactement le même que tout autre. Les principes les plus difficiles à rejeter sont ceux qui font appel à notre besoin de symétrie et élèvent une symétrie observée au rang d'une nécessité. La physique moderne est fondée sur un ensemble de symétries, dont on croit qu'elles s'inscrivent dans les principes les plus fondamentaux. De la même façon que les anciens, beaucoup de théoriciens modernes croient instinctivement que la théorie fondamentale doit être une loi la plus symétrique possible. Doit-on se fier à cette croyance ? Ou doit-on écouter la leçon de l'histoire, qui nous dit (comme dans l'exemple des orbites planétaires) que plus on la regarde de près, moins la nature est symétrique ?

Les symétries les plus profondément ancrées dans la théorie actuelle proviennent de théories einsteiniennes de la relativité restreinte et générale. La plus importante d'entre elles est la relativité des repères inertiels. C'est en effet le principe même de Galilée, qui sert de fondement à la physique depuis le XVII^e siècle. Il énonce qu'on ne peut pas distinguer le repos et le mouvement à vitesse et direction constantes. Ce principe est responsable

du fait qu'on ne sent pas le mouvement de la Terre, ni notre mouvement dans un avion qui traverse le ciel à vitesse constante. Lorsqu'il n'y a pas d'accélération, on ne peut pas sentir son propre mouvement. Une autre façon de l'exprimer serait de dire qu'il n'existe pas d'observateur ni de repère privilégiés : lorsque l'accélération est absente, tout observateur est aussi bon qu'un autre.

En 1905, Einstein a appliqué ce principe à la lumière. La vitesse de la lumière devait être constante indépendamment du mouvement de la source lumineuse de l'observateur. Quel que soit notre mode de déplacement l'un par rapport à l'autre, vous et moi, nous aurions calculé exactement la même valeur de la vitesse de la lumière. C'est le fondement de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein.

Étant donné la théorie de la relativité restreinte, nous pouvons donc faire plusieurs prédictions au sujet de la physique des particules élémentaires. Voici une de ces prédictions concernant les rayons cosmiques : ceux-ci sont des populations de particules, majoritairement des protons (du moins le croit-on), qui traversent l'univers. Ils arrivent au sommet de l'atmosphère terrestre, où ils entrent en collision avec les atomes de l'air, produisant des pluies de particules de divers types que l'on détecte à la surface de la Terre. Personne ne sait quelle est la source de ces rayons, mais plus l'énergie est élevée, plus rares ils sont. On les a observés à des énergies plus grandes que cent millions de fois la masse du proton. Pour atteindre cette énergie, le proton doit se déplacer à une vitesse extrêmement proche de la vitesse de la lumière – une limite qu'aucune particule ne peut franchir, selon la théorie de la relativité restreinte.

On croit que les rayons cosmiques viennent de galaxies éloignées ; si c'est le cas, ils auraient dû voyager pendant des millions et peut-être des milliards d'années avant d'arriver chez nous. Encore en 1966, deux physiciens soviétiques, Georgiy Zatsepine et Vadim Kouzmine, et, indépendamment, le physicien Kenneth Greisen de l'Université Cornell, ont fait une prédiction surprenante au sujet des rayons cosmiques, en n'utilisant que la théorie de la relativité restreinte[10]. Leur prédiction, connue sous le nom de « prédiction GZK », mérite une description détaillée, car des tests sont actuellement en cours. C'est la prédiction la plus extrême jamais produite par la relativité restreinte. En fait, c'est le premier test de la relativité restreinte aux environs de l'échelle de Planck, échelle où les effets de la gravité quantique pourraient être observés.

De bons chercheurs utilisent toujours à leur avantage l'ensemble des instruments dont ils disposent. Greisen, Zatsepine et Kouzmine ont compris que l'on avait accès à un laboratoire beaucoup plus vaste que ce qu'on est capable de construire sur Terre – à savoir l'univers lui-même. On peut détecter les rayons cosmiques qui arrivent sur la Terre après un voyage de milliards d'années à travers une partie substantielle de l'univers. Au cours de leur voyage, des effets très faibles – trop faibles pour qu'on les découvre dans des expériences terrestres –, pourraient s'amplifier jusqu'à devenir visible. Si nous utilisons l'univers comme outil expérimental, nous pouvons regarder beaucoup plus loin dans la structure de la nature que les théoriciens l'ont jamais imaginé.

Le point essentiel est que l'espace traversé par les rayons cosmiques n'est pas vide : il est rempli par la radiation du fond diffus. Greisen et les chercheurs soviétiques ont compris

que les protons dont l'énergie est plus grande qu'une certaine valeur devraient interagir avec les photons du fond diffus et, dans cette interaction, ils devraient produire des particules (le plus probablement des *pions*, ou pi-mesons). Cette création de particules serait une dépense d'énergie et, puisque l'énergie se conserve, les protons à haute énergie devraient ralentir. Ainsi, l'espace ne laisserait pas passer les protons qui portent plus d'énergie qu'il n'en faut pour en faire des pions.

L'espace fonctionnerait donc comme une espèce de filtre. Les protons qui composent les rayons cosmiques ne peuvent voyager qu'à condition qu'ils aient moins d'énergie que le seuil de production des pions. S'ils en ont plus, ils produisent des pions et se ralentissent, jusqu'au moment où leur énergie devient si basse qu'ils ne peuvent plus produire de pions. Tout se passe comme si l'univers avait imposé une limite de vitesse aux protons. Greisen, Zatsepine et Kouzmine ont prédit qu'aucun proton ne pouvait arriver sur la Terre avec plus d'énergie que celle nécessaire pour en faire des pions. L'énergie en question est égale à environ un milliardième de l'énergie de Planck (10^{19} GeV) et on l'appelle « coupure GZK ».

C'est une énergie énorme, plus proche de l'énergie de Planck que tout autre énergie connue à ce jour. Elle est plus de 10 millions de fois plus grande que l'énergie obtenue dans les accélérateurs les plus sophistiqués. La prédiction GZK offre donc le test le plus rigoureux à ce jour de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, car elle sonde la théorie à une énergie plus élevée et à une vitesse plus proche de la vitesse de la lumière que toutes les expériences jamais réalisées, ou même réalisables, sur Terre. En 1966, lorsque la prédiction GZK fut énoncée, on ne pouvait observer que les rayons cosmiques dont les énergies étaient beaucoup plus basses que la coupure, mais, récemment, on a construit quelques instruments qui peuvent détecter les particules des rayons cosmiques au niveau de la coupure GZK et même au-delà. Une de ces expériences, appelée AGASA (pour *Akeno Giant Air Shower Array*), est menée au Japon et a permis de découvrir au moins une douzaine de ces événements extrêmes. L'énergie impliquée dans ces événements dépasse 3 x 10^{20} eV – en gros, toute l'énergie qu'un footballeur peut donner au ballon, portée par un seul proton.

Ces phénomènes pourraient être un signe que la relativité restreinte ne s'applique pas aux énergies extrêmes. Les physiciens Sidney Coleman et Sheldon Glashow ont proposé, à la fin des années 1990, qu'une faille dans la relativité restreinte pourrait augmenter l'énergie nécessaire pour produire des pions, en augmentant ainsi l'énergie de coupure GZK, permettant aux protons dotés d'une énergie beaucoup plus élevée d'atteindre nos détecteurs terrestres[11].

Ce n'est pas la seule explication possible de l'observation de ces protons cosmiques à haute énergie. Il se pourrait qu'ils viennent de sources assez proches de la Terre, de sorte qu'ils n'ont pas eu encore le temps d'être ralentis par l'interaction avec le fond diffus. On peut vérifier cette hypothèse en observant les protons en question et en déterminant s'ils nous viennent d'un lieu précis de l'espace. À ce jour, nous n'en avons aucune preuve, mais la possibilité demeure.

Il est également possible que ces particules à énergie extrêmement élevée ne soient pas du tout des protons. Elles pourraient être des particules d'une espèce encore inconnue, stable, dont la masse dépasse largement celle des protons. Si c'était le cas, cela pourrait être une autre découverte majeure.

Certes, il est toujours possible que nos expériences contiennent des erreurs. Le groupe d'AGASA postule que les mesures d'énergie qu'ils ont réalisées sont précises avec à peu près 25 % d'incertitude. Bien que ce soit un pourcentage d'erreur élevé, il n'est toujours pas suffisant pour expliquer, à lui seul, l'existence des phénomènes de haute énergie qu'ils ont observés. Cependant, leur estimation du degré de précision de leur expérience pourrait aussi être erronée.

Heureusement, une autre expérience est actuellement en cours, qui devrait trancher. Il s'agit du détecteur Auger de rayons cosmiques, en fonctionnement dans les pampas d'Argentine occidentale. Si le détecteur Auger confirme l'observation japonaise et s'il est possible par la suite de disqualifier toutes les autres explications possibles, alors cela serait la découverte la plus importante depuis au moins cent ans : le premier cas d'un échec des théories fondamentales, qui ont été au cœur même de la révolution scientifique du XX^{e} siècle.

Que faut-il faire pour observer les particules des rayons cosmiques portant une énergie si grande ? Quand une particule d'une telle énergie frappe le sommet de l'atmosphère, elle produit une pluie d'autres particules qui tombent sur une surface de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. L'expérience d'Auger consiste en des centaines de détecteurs placés sur une aire de trois milles kilomètres carrés dans les pampas argentines. Quelques détecteurs lumineux à haute résolution (HiRe) également installés sur le site scannent le ciel afin d'attraper la lumière produite par la pluie des particules. En combinant les signaux venant de ces différents détecteurs, les chercheurs d'Auger déterminent l'énergie de la particule initiale qui a frappé l'atmosphère, ainsi que la direction d'où cette particule est arrivée.

À ce jour, l'observatoire Auger est en train de rendre publiques ses premières données. L'expérience fonctionne bien, mais nous n'avons encore aucune donnée pour décider si la coupure prédite par la relativité restreinte est observée ou non. Pourtant, il est sensé d'espérer qu'après quelques années, l'expérience aura produit assez de données pour trancher.

Si le groupe Auger prouve que la relativité restreinte reste viable, cette découverte sera tout de même à elle seule la plus importante en physique fondamentale des vingt-cinq dernières années – depuis l'échec des tentatives de découvrir la décomposition du proton (voir chapitre 4). La longue et ténébreuse période où la théorie s'est développée sans expérimentation sera enfin terminée. Si Auger découvre que la relativité restreinte n'est pas rigoureusement vraie, alors ce sera le début d'une ère nouvelle en physique fondamentale. Par conséquent, cela vaut la peine que nous prenions ici un peu de temps pour explorer les conséquences d'une découverte si révolutionnaire et les nouveaux horizons qu'elle ouvrirait.

14
Construire sur Einstein

Supposez que le projet Auger, ou une autre expérience, montre que la théorie de relativité restreinte d'Einstein échoue. Cela serait une mauvaise nouvelle pour la théorie des cordes, puisque cela signifierait que la première grande découverte expérimentale du XXI[e] siècle n'aura absolument pas été prévue par la plus populaire des « théories du tout ». La théorie des cordes suppose que la relativité restreinte est vraie sous une forme exactement identique à celle décrite par Einstein il y a cent ans. En effet, un résultat majeur de la théorie des cordes est d'être cohérente à la fois avec la théorie quantique et la relativité restreinte. En conséquence, la théorie des cordes prédit que, quelle que soit la distance entre leurs sources, les photons ayant des fréquences différentes se déplacent à la même vitesse. Je disais plus haut que la théorie des cordes ne faisait pas de prédictions, mais en réalité, je viens d'énoncer la seule prédiction de la théorie des cordes qu'on puisse tester avec nos outils actuels.

Que signifierait la falsification des prédictions de la relativité restreinte ? Une première possibilité est que la relativité restreinte n'est tout simplement pas une bonne théorie ; une seconde possibilité mène non pas à un renoncement, mais à un approfondissement de la relativité restreinte. C'est à partir de cette distinction que commence l'histoire d'une idée nouvelle, peut-être la plus surprenante parmi toutes celles qui ont émergé ces dix dernières années.

Il existe quelques expériences en cours qui pourrait révéler une faille ou une modification de la relativité restreinte. L'expérience Auger en fait partie, mais également nos observations des sursauts gamma. Ce sont des rafales énormes de rayons gamma, qui peuvent en quelques secondes produire autant de rayonnement qu'une galaxie entière. Comme leur nom l'indique, une grande partie de ce rayonnement est émise sous la forme de rayons gamma, photons à haute énergie. Les signaux de ces explosions atteignent la Terre à peu près une fois par jour. On les a détectés pour la première fois au début des années 1960 à l'aide des satellites militaires, destinés à déceler les tests illégaux d'armes nucléaires. Aujourd'hui, ils sont observés par des satellites scientifiques, construits exprès pour les détecter.

On ne sait pas précisément quelle est la source des sursauts gamma, bien qu'il existe à ce sujet quelques théories plausibles. Ils pourraient provenir de deux étoiles à neutrons, ou d'une étoile à neutrons et d'un trou noir. Les membres de chacun de ces couples auraient tourné l'un autour de l'autre pendant des milliards d'années, pourtant on sait que les systèmes de ce type sont instables. Lorsqu'ils émettent de l'énergie sous la forme d'ondes gravitationnelles, ils se dirigent l'un vers l'autre dans un mouvement en spirale, très lent, et finalement entrent en collision et explosent en provoquant un phénomène cosmique parmi les plus violents et les plus énergétiques que nous connaissons.

La théorie de la relativité restreinte d'Einstein révèle que toute la lumière voyage avec la même vitesse, quelle que soit sa fréquence. Or les sursauts gamma nous fournissent un laboratoire pour tester cette affirmation, parce qu'ils produisent un faisceau très bref de photons distribués selon une large gamme d'énergies. Encore plus important, ces photons ne nous atteignent que des milliards d'années après leur naissance, ce qui rend possible l'expérimentation.

Supposez qu'Einstein ait tort et que les photons d'énergies diverses se déplacent à des vitesses légèrement différentes. Si deux photons créés dans la même explosion éloignée arrivaient sur la Terre à des moments différents, ceci indiquerait sans aucun doute une faille sérieuse dans la théorie de la relativité restreinte.

Que pourrait impliquer une découverte capitale de ce genre ? Cela dépendra de l'échelle physique où apparaîtra le phénomène. On s'attend à ce que l'une des échelles possibles soit la longueur de Planck. Rappelez-vous que celle-ci est égale à la taille du proton multipliée par 10^{-20} environ. La théorie quantique nous dit que cette échelle représente le seuil au-dessous duquel l'image classique de l'espace-temps se désintègre. La relativité restreinte d'Einstein faisant partie de cette image classique, on peut s'attendre à ce qu'elle ne soit plus applicable à ce point précis.

Une expérience pourrait-elle donc sonder cette désintégration de l'image classique de l'espace et du temps à l'échelle de Planck ? Grâce aux capacités de l'électronique actuelle, on sait détecter des différences très petites dans les instants temporels d'arrivée des photons ; mais l'électronique actuelle suffit-elle pour mesurer les effets encore plus subtils de la gravité quantique ? Pendant des décennies, nous avons affirmé que l'échelle de Planck était si petite qu'aucune expérience réalisable ne pouvait la détecter, tout comme il y a cent ans, la plupart des professeurs affirmaient que les atomes sont trop petits pour qu'on puisse les voir. Un tel mensonge a été énoncé dans une quantité innombrable d'articles et de conférences. Car c'est bien un mensonge !

Il est remarquable qu'il ait fallu attendre le milieu des années 1990 pour comprendre qu'on pouvait réellement sonder l'échelle de Planck. Comme c'est parfois le cas, quelques personnes l'avaient déjà compris, mais on leur a demandé de se taire lorsqu'ils ont essayé de publier leurs idées. Un d'eux était le physicien espagnol Luis Gonzalez-Mestres, du Centre national de la recherche scientifique à Paris. Or, une telle découverte peut être réalisée plusieurs fois, de façon indépendante, jusqu'à ce que quelqu'un réussisse enfin à attirer l'attention de la communauté des spécialistes. C'est ce qu'a réussi à faire Giovanni Amelino-Camelia de l'Université de Rome. Aujourd'hui âgé de quarante ans, Amelino-

Camelia est un physicien motivé, passionné et rigoureux qui porte en lui le charme et le feu associés aux tempéraments latins. La communauté de la gravité quantique a de la chance de le compter parmi ses membres.

Quand Amelino-Camelia était en post-doc à Oxford, il s'est assigné pour tâche de chercher une méthode pour observer la physique à l'échelle de Planck, une ambition totalement folle à l'époque. Mais il s'est mis au défi de prouver que ce que l'on croyait communément était faux. Il s'est inspiré des tests de la décomposition des protons dont on avait prédit (voir chapitre 4) qu'elle ne serait qu'un événement très rare mais qui, cependant, pourrait se produire si l'on rassemblait suffisamment de protons, le grand nombre de protons jouant alors le rôle d'amplificateur. La question que s'est posée Amelino-Camelia était de savoir si un amplificateur de ce genre pourrait permettre de détecter les phénomènes à l'échelle de Planck.

On a déjà discuté de deux exemples d'amplification utile : les rayons cosmiques et les photons provenant des sursauts gamma. Dans les deux cas, l'univers lui-même fut utilisé comme amplificateur. Sa taille gigantesque amplifie la probabilité des événements extrêmement rares, et le temps énorme qu'il faut à la lumière pour le traverser peut amplifier des effets minuscules. On a déjà dit que les expériences de ce genre pourraient théoriquement nous fournir des signes de la non-applicabilité de la relativité restreinte. Amelino-Camelia a ainsi découvert que nous pouvions mener des expériences pour sonder l'échelle de Planck et, par conséquent, la gravité quantique.

Une variation typique de la vitesse d'un photon due à la gravité quantique serait extrêmement petite, mais son effet pourrait être considérablement amplifié par le temps de son voyage depuis le sursaut gamma, qui peut se mesurer en milliards d'années. Il y a quelque temps, les physiciens ont calculé, en utilisant des approximations grossières des effets de la gravité quantique, que le temps entre l'arrivée de photons d'énergies différentes qui ont tous fait ce long chemin jusqu'à la Terre serait d'environ un millième de seconde. C'est une petite durée temporelle, mais tout à fait dans les limites de ce qu'on peut mesurer à l'aide de l'électronique moderne. En effet, le détecteur de rayons gamma tout neuf, appelé GLAST (pour *Gamma Ray Large Area Space Telescope*), possède cette sensibilité. Il doit être mis en service au cours de l'été 2007 et nous avons hâte de consulter ses premiers résultats.

Depuis que la barrière a été pour la première fois franchie par Amelino-Camelia et ses collaborateurs, on a découvert qu'il existait plusieurs façons de sonder l'échelle de Planck avec les expériences réelles. La question d'Amelino-Camelia, qui semblait insensée, s'est transformée en une discipline scientifique respectable.

Supposez donc maintenant qu'un nouveau résultat expérimental contredise la relativité restreinte à l'échelle de Planck. Qu'est-ce que cela nous dira à propos de la nature de l'espace et du temps ?

J'ai mentionné au début de ce chapitre qu'il existait deux réponses possibles. Nous en avons déjà discuté une, celle qui dit que le principe de relativité du mouvement est faux – c'est-à-dire qu'on pourrait en effet distinguer entre le mouvement absolu et le repos absolu. Ceci aurait renversé un principe qui était la cheville ouvrière de la physique depuis Ga-

lilée. Personnellement, je trouve cette possibilité odieuse, mais en tant que scientifique je dois admettre qu'elle est bien réelle. En effet, si les résultats d'AGASA, l'expérience japonaise sur les rayons cosmiques, tiennent, on en déduira qu'on a déjà rencontré une faille dans les lois de la relativité restreinte.

Mais est-ce la seule possibilité ? La majorité des physiciens diraient probablement que si des photons d'énergies différentes se déplacent avec des vitesses différentes, alors la relativité restreinte est fausse. J'aurais certainement dit la même chose moi-même il y a dix ans. J'aurais eu tort.

La relativité restreinte d'Einstein est fondée sur deux postulats : le premier est la relativité du mouvement et le second la constance et l'universalité de la vitesse de la lumière. Serait-il possible que le premier postulat soit vrai et le second, faux ? En effet, si une telle situation n'avait pas été possible, Einstein n'aurait pas différencié les deux postulats. Mais je ne crois pas que, jusqu'à récemment, beaucoup de scientifiques aient compris qu'il pouvait y avoir une théorie cohérente où seulement le second postulat serait modifié. Il s'avère qu'il peut y en avoir une, et la recherche dans cette direction fut l'une des étapes les plus fascinantes de ma carrière scientifique.

La nouvelle théorie s'appelle « relativité restreinte déformée » ou « doublement restreinte » (DSR). Elle est apparue à la suite d'une question simple qui pourtant menait à un paradoxe.

Comme je l'ai dit, la longueur de Planck est le seuil au-dessous duquel une géométrie nouvelle pourrait se révéler, qui serait intrinsèquement quantique. Les différentes approches de la gravité quantique s'accordent sur une chose : la longueur de Planck est, dans un certain sens, la longueur de la chose la plus petite qu'on puisse observer. Une question s'en suit : *tous* les observateurs seront-ils d'accord sur la valeur de la longueur la plus courte ?

Selon la relativité restreinte d'Einstein, les différents observateurs sont en désaccord sur la longueur des objets en mouvement. Un observateur qui est monté, telle une sorcière, sur une baguette d'un mètre et qui se promène sur cette baguette, dira toujours que la longueur de la baguette est égale à un mètre. Mais n'importe quel autre observateur qui se trouve en mouvement par rapport à la baguette dira que sa longueur est de moins d'un mètre. Einstein a appelé ce phénomène « contraction des longueurs ».

Mais ceci implique qu'il ne peut y avoir de « longueur minimale ». Que la longueur d'une chose soit courte ou pas, on peut toujours la faire encore plus courte en entrant en mouvement relativement à elle, avec une vitesse très proche de celle de la lumière. Ainsi, il semble qu'il y ait une contradiction entre l'idée de la longueur de Planck et la relativité restreinte.

On pourrait penser que tous ceux qui ont travaillé sur le problème de la gravité quantique ont déjà buté sur cette contradiction. On pourrait même penser qu'un étudiant très brillant, en première année de physique, s'est déjà posé cette question. Après tout, tout physicien talentueux qui travaille jour et nuit sur la théorie des cordes et sur la gravité quantique fut jadis un étudiant naïf ! Combien donc ont entrevu ce problème ? À ma connaissance, très peu, jusqu'à une période très récente.

Giovanni Amelino-Camelia semble avoir eu conscience de l'existence de ce problème. En 1999, il s'est heurté au paradoxe que je viens de décrire et l'a résolu. Son idée était d'étendre le raisonnement qui avait conduit Einstein à la relativité restreinte.

Le second postulat de la relativité restreinte, l'universalité de la vitesse de la lumière, paraît presque contradictoire. Pourquoi ? Considérez un photon unique, suivi par deux observateurs. Supposez que ces deux observateurs soient en mouvement l'un par rapport à l'autre. S'ils mesurent la vitesse du photon, on s'attendrait normalement à ce qu'ils obtiennent des résultats différents, parce que c'est ainsi que se comportent les objets normaux. Si je vois un bus qui passe à côté de moi à une vitesse qui me semble égale à 10 kilomètres par heure, parce que je me trouve dans une voiture qui roule sur une autoroute à la vitesse de 140 kilomètres par heure, un observateur au repos au bord de l'autoroute verra le bus se déplacer à 150 kilomètres par heure. Mais si j'observe dans les mêmes circonstances non pas un bus, mais un photon, la relativité restreinte dit que l'observateur sur le bord de l'autoroute aura mesuré exactement la même vitesse du photon que celle que j'ai mesurée en étant dans ma voiture.

Pourquoi donc n'est-ce pas une contradiction ? La clef de la réponse est qu'on ne mesure pas la vitesse directement. La vitesse est un quotient : c'est une certaine distance divisée par un certain intervalle de temps. L'idée centrale d'Einstein était que les différents observateurs observent la même vitesse du photon, même s'ils sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, parce qu'ils observent l'espace et le temps de façon différente. Leurs mesures du temps et de la distance varient de telle manière qu'une seule vitesse, celle de la lumière, est universelle.

Mais si l'on peut réaliser une telle chose pour une constante donnée, pourquoi pas pour une autre ? Ne pourrait-on pas utiliser la même astuce avec la distance ? En général, des observateurs en mouvement qui mesurent la longueur d'une baguette d'un mètre pensent qu'elle est inférieure à un mètre. Ceci est vrai pour la majorité des longueurs, mais peut-on faire en sorte que, lorsqu'on descend, en dernier lieu, jusqu'à la longueur de Planck, l'effet de contraction disparaisse ? Si la longueur de la baguette est exactement égale à la longueur de Planck, alors les deux observateurs seraient d'accord sur la valeur de la longueur, même s'ils sont en mouvement. Pourrait-il donc y avoir deux quantités universelles : une vitesse et une longueur ?

Einstein avait utilisé une première astuce : rien ne peut se déplacer plus vite que la lumière. Dans le monde, il existe donc deux sortes de choses : celles qui vont à la vitesse de la lumière, et les plus lentes. Si un observateur voit un objet qui se déplace à la vitesse de la lumière, l'image sera identique pour tous les autres observateurs. Et si un observateur voit qu'un autre objet se déplace moins vite que la lumière, alors pour tous les observateurs la vitesse de cet objet sera également inférieure à celle de la lumière.

L'idée d'Amelino-Camelia consistait à utiliser la même astuce pour les longueurs. Il a proposé une modification des règles qui permettent de calculer les divergences entre des mesures spatio-temporelles différentes, de telle façon qu'un objet ayant la longueur de Planck soit perçu par tous les observateurs comme ayant cette longueur, et qu'un objet plus long que la longueur de Planck soit aussi perçu de cette façon par tous les observa-

teurs. On peut rendre ce schéma cohérent parce que, et c'est là l'astuce : rien n'existe qui pourrait être plus court que la longueur de Planck, quel que soit l'observateur.

Amelino-Camelia a vite découvert qu'il existait une modification des équations de la relativité restreinte d'Einstein qui réalise cette idée. Il l'a appelée « relativité doublement restreinte », car on met deux fois en pratique l'astuce qui, utilisée une seule fois, a donné la relativité restreinte einsteinienne. Même si j'ai suivi Amelino-Camelia dans ses efforts visant à inventer des méthodes nouvelles pour sonder l'échelle de Planck, en 2000, lorsqu'il a fait circuler pour la première fois l'idée de la relativité doublement restreinte, je ne l'ai d'abord pas comprise[12].

C'est assez embarrassant, mais une chose l'est encore plus. Il y a dix ans, j'ai moi-même rencontré ce paradoxe. Il m'est apparu dans un travail que je faisais à l'époque sur une théorie quantique de gravitation appelée « gravité quantique à boucles ». Les détails ne sont pas importants ; il suffit de savoir que les calculs en gravité quantique à boucles ont apparemment contredit la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. Mais à l'époque, une telle possibilité était trop effrayante pour qu'on s'y arrête, et après m'être battu contre elle, j'ai arrêté toute recherche dans ce sens. En effet, ce n'était qu'un premier pas dans une série d'autres qui m'ont amené, finalement, à abandonner la gravité quantique à boucles et à passer un certain temps à travailler sur la théorie des cordes.

Mais juste avant d'abandonner, j'ai eu cette idée : peut-être pouvait-on modifier la relativité restreinte de telle façon que tous les observateurs, qu'ils soient en mouvement ou pas, soient d'accord sur ce qu'est la longueur de Planck. C'est l'idée de base de la relativité doublement restreinte, mais je n'avais pas assez d'imagination pour pouvoir la transformer en quelque chose d'intéressant. J'y ai un peu réfléchi, je n'ai pas réussi à la rendre sensible, et je suis parti sur autre chose. Or, quand j'ai lu l'article d'Amelino-Camelia dix ans plus tard, cette idée ne m'est pas revenue à l'esprit. Il m'a fallu suivre un autre chemin pour la retrouver. À l'époque, j'étais professeur en visite à l'Imperial College de Londres et j'avais rencontré un scientifique remarquable du nom de João Magueijo, un jeune cosmologue brillant d'origine portugaise, ayant environ le même âge que Giovanni Amelino-Camelia et un tempérament latin aussi affirmé.

João Magueijo était réputé pour avoir une idée tout à fait folle, à savoir que la lumière avait eu une vitesse plus grande au début de l'univers. Cette idée rend caduque le concept d'inflation, puisqu'elle explique comment chaque région de l'univers primordial a pu se trouver en contact avec les autres, et par conséquent à une température uniforme. On n'aurait donc plus besoin de l'expansion exponentielle au début de l'univers pour tenir compte de l'uniformité de la température.

C'est un joli concept, mais vraiment dingue – vraiment très dingue ! Il est à la fois en désaccord avec la relativité restreinte et la relativité générale. Il ne peut être qualifié autrement que d'» hérétique ». Pourtant, le monde académique anglais a une faiblesse pour les hérétiques, et Magueijo prospérait à l'Imperial College. S'il avait été aux États-Unis, je doute qu'avec une pareille idée en tête, il aurait pu ne serait-ce qu'être recruté comme post-doc.

Magueijo a développé son idée avec un jeune professeur d'Imperial College du nom d'Andreas Albrecht, qui, lors de ses études à l'université de Pennsylvanie, était un des inventeurs de l'inflation. Peu de temps auparavant, Albrecht a quitté l'Angleterre pour revenir en Amérique. Quelques mois après mon arrivée, j'ai trouvé Magueijo à la porte de mon bureau. Il a voulu savoir s'il existait une façon de rendre son idée de cosmologie à vitesse variable de la lumière (VSL) cohérente avec la relativité restreinte et générale. Pour une raison que j'ignore, il a eu le sentiment que d'en parler avec moi pourrait l'aider.

À l'époque j'ignorais que tout cela avait déjà été réalisé. En effet, l'ensemble de la cosmologie VSL avait été développé à Toronto, par un professeur de physique doté d'une grande imagination, John Moffat. Hérétique plus souvent qu'à son tour, Moffat a inventé la théorie et l'a élaborée de telle façon qu'elle soit cohérente avec les théories de relativité restreinte et de relativité générale ; mais ses tentatives de la publier dans une revue scientifique n'ont pas abouti.

Selon ce qu'affirme João dans son livre publié en 2003, *Plus vite que la lumière*, il a appris l'existence du travail de Moffat quand ils ont essayé, Albrecht et lui, de publier leur propre article[13]. La réponse de João – et cela le caractérise parfaitement – a été de féliciter Moffat comme un ami – et en effet, ils sont amis. Ainsi, il connaissait déjà le travail de Moffat quand il a voulu me parler, mais je ne crois pas qu'il avait compris, à l'époque que Moffat avait déjà résolu les problèmes auxquels il s'attaquait. Ou s'il le comprenait, il n'aimait pas la façon dont ce dernier s'y était pris.

John Moffat est maintenant mon ami et collègue à l'Institut Perimeter de physique théorique. Il n'existe personne que je respecte plus pour son audace et son originalité. J'ai déjà dit à quel point j'admirais Giovanni Amelino-Camelia pour ses découvertes sur le sondage de l'échelle de Planck. Il m'est donc douloureux d'admettre que João et moi-même avons ignoré le travail qu'ils ont tous deux réalisé. Dans un certain sens, cette ignorance nous fit du bien, parce que nous avons ainsi trouvé un autre moyen de rendre cohérente avec les principes de la relativité une vitesse de la lumière qui serait variable. Je ne l'aurais certainement pas abordé si j'avais su que le problème était déjà résolu – pas une, mais deux fois.

João venait souvent me parler à ce propos. Je prenais toujours le temps de discuter avec lui, parce que j'étais attiré par son énergie et sa fraîcheur dans sa façon d'aborder la physique. Mais pendant de longs mois, je ne me suis pas donné le temps de réfléchir en profondeur à ce qu'il me disait. Le déclic est venu quand il m'a montré un vieux livre où le problème était discuté. C'était un manuel de relativité générale, écrit par le célèbre physicien russe Vladimir Fock[14]. Je connaissais quelques travaux de Fock en théorie quantique des champs (tous les physiciens les connaissent), mais je n'avais jamais lu son livre sur la relativité générale. Le problème sur lequel João voulait que je réfléchisse était, dans le livre de Fock, un exercice laissé au lecteur. Quand je l'ai lu, je me suis rappelé mon idée d'il y a dix ans, et tout s'est remis dans l'ordre. La clef a été, en effet, de garder les principes de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, mais d'en modifier les règles de telle façon que tous les observateurs seront d'accord pour dire que la vitesse de la lumière et l'échelle de

Planck sont toutes deux universelles. Tous les photons n'ont plus une vitesse constante, seulement ceux ayant des énergies très basses.

Au début, nous ne savions pas quoi faire de cette idée. Les concepts étaient là, quelques éléments des mathématiques aussi, mais pas encore une théorie complète. À peu près à la même époque, je fis un voyage qui comprenait une étape à Rome, où je passai plusieurs heures à discuter avec Giovanni Amelino-Camelia et tout à coup, je compris ce qu'il me disait. Il en était arrivé à la même idée que nous, mais plus tôt. Néanmoins, beaucoup de choses demeuraient dans sa façon de faire que je ne comprenais toujours pas. Les maths paraissaient compliquées, et son idée était liée à un formalisme inventé dix ans plus tôt par un groupe de physiciens mathématiciens polonais – formalisme que je ne pouvais certainement pas appréhender.

Cela m'aurait pris plusieurs années pour apprécier les subtilités mathématiques du sujet. Je les trouvais incompréhensibles jusqu'au moment où j'ai commencé à lire les articles publiés au début de sa carrière par un mathématicien anglais du nom de Shahn Majid, un des inventeurs des groupes quantiques. Son travail était intimement lié aux mathématiques utilisées par le groupe polonais. Majid a commencé avec quelques idées visionnaires sur la façon d'exprimer les éléments essentiels de la relativité et de la théorie quantique en une seule structure mathématique. Cela l'a conduit aux groupes quantiques (qui sont une extension révolutionnaire de l'idée de symétrie) et ensuite aux modifications de la théorie de relativité fondées sur des recherches dans un domaine qu'on appelle « géométrie non commutative ». Ces percées sont au cœur des mathématiques nécessaires pour exprimer DSR clairement, mais elles se perdaient – au moins, en ce qui me concerne – dans les textes compliqués où je les avais rencontrées pour la première fois.

En tout cas, João et moi ignorions ces mathématiques. Nous ne parlions que de physique. Ensuite, notre progression fut interrompue par mon déménagement au Canada, en septembre 2001, à l'Institut Perimeter qui venait d'être créé. Un mois plus tard, João est venu à Perimeter en tant que deuxième professeur en visite. Un après-midi après son arrivée, la théorie a finalement été mise en place. Nous travaillions dans un café nommé Le Symposium, à Waterloo, dans de confortables canapés. Il souffrait du jet-lag. J'étais traumatisé et épuisé, étant juste rentré d'un week-end à New York après les événements du 11 septembre. Je me suis endormi pendant que João parlait et, quand je me suis réveillé, je l'ai trouvé somnolant. Je me suis rappelé quelque chose qu'il disait pendant que je sombrais et j'ai noté cela dans mon bloc-notes, puis je me suis à nouveau endormi. Ensuite, je me suis réveillé quand il a recommencé à parler, et nous avons eu quelques minutes de lucidité avant qu'il ne s'endorme à nouveau. Ainsi s'est passé tout l'après-midi : nous discutions, faisions les calculs et puis nous nous endormions. Je ne peux qu'imaginer ce qu'a pensé le personnel du café. Mais, à un certain moment de cet après-midi, nous avons trouvé le facteur clef qui nous avait échappé pendant des mois, et qui concernait une sorte de compensation mutuelle entre les impulsions et les positions. Quand nous avons fini, nous avons inventé la deuxième version de DSR, qui était beaucoup plus simple que celle élaborée par Giovanni Amelino-Camelia. Les experts la connaissent désormais sous le nom de DSR-II.

Le résultat était à peu près ce que João voulait. Dans notre version, les photons qui ont plus d'énergie se déplacent plus vite. Ainsi, au tout début de l'univers, quand la température était très élevée, la vitesse de la lumière était en moyenne plus grande que ce qu'elle est maintenant. Mais lorsqu'on remonte dans le temps, la température se rapproche de l'énergie de Planck et la vitesse de la lumière devient infinie. Cela nous a pris un peu plus de temps de démontrer que ce résultat menait à une version de la théorie de la vitesse variable de la lumière, qui est aussi cohérente avec les principes de la relativité *générale*, mais, finalement, nous y sommes aussi parvenus. Inspirés par le roman de Thomas Pynchon, nous avons appelé cette théorie « *Gravity's Rainbow* ».

« Relativité doublement restreinte » est un nom stupide, mais il est resté. L'idée était élégante et, aujourd'hui, beaucoup l'étudient et en discutent. Nous ne savons pas si elle décrit la nature, ou pas, mais nous en savons assez pour savoir qu'elle le pourrait.

Les premières réponses à la DSR n'étaient pas très encourageantes. Certains ont dit qu'elle était incohérente ; d'autres, qu'elle n'était qu'une façon très compliquée de décrire la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. Quelques-uns firent les deux reproches à la fois.

Nous avons répondu à la deuxième critique en démontrant que la théorie faisait des prédictions différentes de celles de la relativité restreinte. Le rôle central dans ces discussions fut tenu par Jerzy Kowalski-Glikman, un fanatique de musique *heavy metal* très cultivé venant de Varsovie. (Il n'est pas exclu que seul un Européen puisse être ces deux choses à la fois.) Je crois qu'il était le premier à comprendre réellement ce que disait Giovanni Amelino-Camelia ; j'avais compris ses articles, qui étaient courts et clairs comme du cristal, avant de comprendre ceux de Giovanni, qui étaient longs, imprimés dans une très petite police et remplis de détails et de digressions. Jerzy a découvert quelques conséquences importantes de la relativité doublement restreinte, et c'est lui qui a mis au jour la relation entre nos efforts et le travail mathématique antérieur de ses collègues polonais.

Le tournant dans ma compréhension de DSR et de la façon dont les différentes approches y étaient liées a été une discussion que nous avons eue un après-midi, à la maison de mon amie à Toronto. Giovanni, Jerzy, João et moi-même, nous nous sommes entassés autour d'une petite table dans son étroite salle à manger, en essayant d'aller jusqu'au bout dans nos malentendus et dans nos désaccords. Jerzy insistait sur le fait que si l'on voulait que quelque chose fasse sens, cela devait s'insérer dans une structure mathématique cohérente. C'était, pour lui, la géométrie non commutative, qu'il avait étudiée avec ses collègues polonais. João affirmait qu'on pouvait comprendre tout ce qui était lié à la physique sans faire de mathématiques extravagantes. Giovanni répondait que c'était facile de dire des bêtises au sujet de ces théories si on ne faisait pas assez attention à formuler les expressions mathématiques qui correspondaient aux choses mesurables. À un moment – je ne me souviens plus du commentaire particulier qui l'a déclenché – Giovanni a pris un grand couteau à pain et a hurlé : « Si ce que vous dites est vrai, je me coupe la gorge. *Maintenant* ! »

Nous l'avons regardé avec stupeur, et après un moment de silence, nous nous sommes mis à rire, et lui aussi. C'est seulement à partir de ce moment que nous avons commencé à écouter ce que disaient les autres.

En fait, il existe des versions différentes de DSR, qui donnent des prédictions différentes. Pour certaines, il existe une énergie qu'on ne peut pas dépasser, par analogie à la vitesse maximale de la lumière. Pour d'autres, il n'existe pas d'énergie maximale, mais une impulsion maximale. C'est un peu malheureux, car cela réduit le pouvoir prédictif de la théorie, mais en même temps cela ne semble pas diminuer son degré de cohérence ; il nous faut donc vivre avec.

La cohérence de DSR a été démontrée en décrivant un univers possible où elle pourrait être vraie. Cet univers possible est comme le nôtre, à la différence que son espace n'a que deux dimensions. On a découvert en 1980 que la gravité quantique pouvait être définie précisément dans un monde à seulement deux dimensions spatiales. On l'a appelée « gravité quantique 2 + 1 », c'est-à-dire deux dimensions de l'espace et une du temps. De plus, s'il n'y a pas de matière, la théorie peut être résolue exactement – c'est-à-dire que l'on peut trouver des expressions mathématiques précises qui répondent à toute question que l'on peut poser à propos du monde décrit par la théorie.

Il s'avère que DSR est vraie dans tous les mondes avec deux dimensions spatiales, la gravité quantique et la matière. La forme particulière de DSR qui s'y trouve réalisée est celle découverte initialement par Giovanni. Après une recherche supplémentaire dans la littérature, Jerzy et moi-même notâmes que quelques personnes, avant même que le concept de DSR ne soit inventé, avaient éclairci certaines caractéristiques d'un monde bidimensionnel qui étaient des aspects de DSR. Fascinés, nous en avons parlé à un collègue de Perimeter, d'origine française, Laurent Freidel, qui travaillait sur la gravité quantique. Il nous a dit que non seulement il le savait déjà, mais qu'il avait essayé de nous le dire, à nous. Je suis sûr que c'est vrai. En effet, pendant les discussions, Freidel est plus énergique que moi et, d'habitude, je n'arrive pas à comprendre ce qu'il dit ; il répond en parlant encore plus vite et plus fort. Quoi qu'il en soit, nous avons écrit ensemble un article où nous avons expliqué pourquoi DSR devait être vraie dans tous les univers avec deux dimensions spatiales[15].

Quelque temps après, Freidel en collaboration avec Etera Livine, un post-doc à Perimeter d'origine française tahitienne, ont montré en détail comment DSR marche dans la théorie de la gravité en dimension 2 + 1 avec la matière[16]. Ce sont des résultats importants, parce que le fait qu'il existe un modèle de monde possible où DSR est vraie garantit la cohérence de la théorie.

Il restait un autre problème à résoudre avant de pouvoir considérer DSR comme une théorie viable. Comme je l'ai déjà dit, dans plusieurs de ses versions, il existe une énergie maximale pour une particule, que l'on considère d'habitude égale à l'énergie de Planck. Sur le plan expérimental cela ne présente pas de problème, car l'énergie la plus grande jamais observée est celle des protons des rayons cosmiques dans le détecteur AGASA, qui sont à peu près à un milliardième de ce maximum.

Mais, au premier abord il semble que la frontière énergétique doive s'appliquer à toute sorte de corps : non seulement les électrons et les protons, mais aussi les chiens, les étoiles

et les ballons de foot doivent tous avoir une énergie inférieure au maximum. Cela entre clairement en contradiction avec la nature, parce qu'un système composé de plus de 10^{19} protons a plus d'énergie que la masse de Planck. Les chiens ont environ 10^{25} protons et les étoiles, encore plus. Nous avons baptisé cela le « problème du ballon de football ».

Le problème du ballon de football existe dans le monde bidimensionnel mais il n'est pas nécessaire de l'y résoudre, puisque nous ne faisons pas d'expérience dans ce monde. Là, il est simplement vrai que tout objet possède une énergie inférieure à l'énergie de Planck, quel que soit le nombre de particules dont il est composé.

Il y a une solution naturelle au problème du ballon de football, qui pourrait valoir dans notre monde à trois dimensions spatiales. João et moi avons proposé cette solution assez tôt. L'idée est qu'un corps a une énergie maximale quand il a une quantité d'énergie égale à l'énergie de Planck, pour chaque proton qu'il contient. Par conséquent, un ballon de football, avec environ 10^{14} protons, ne peut avoir une énergie qui dépasse 10^{25} énergies de Planck. Il n'y a aucun désaccord avec l'observation.

Nous étions capables de montrer que cette solution pouvait marcher, mais nous ne savions pas pourquoi elle devait être vraie. Une explication a récemment été proposée par Etera Livine et Florian Girelli, un autre post-doc d'origine française à Perimeter. Ils ont trouvé une façon remarquable de reformuler la théorie de telle manière que la solution vient d'elle-même[17]. Une fois le problème du ballon de football résolu, autant que je sache, il ne reste plus d'obstacle à ce que DSR soit vraie dans notre monde. Elle pourrait être confirmée par les observations d'Auger et GLAST, qui seront réalisées au cours des prochaines années ; sinon, on prouvera au pire qu'elle est fausse, ce qui signifie que DSR est une véritable théorie scientifique.

Nous pouvons maintenant nous tourner vers les implications d'une faille possible de la relativité restreinte sur les différentes théories de la gravité quantique. On a déjà vu qu'une telle faille signifierait deux choses différentes, selon ce que nous diront les expériences. La relativité restreinte pourrait entièrement cesser de s'appliquer à cette échelle, ce qui voudrait dire qu'il y a effectivement une distinction absolue entre le mouvement et le repos. Ou bien la relativité restreinte pourrait être sauvée, mais approfondie, comme dans le cas de DSR.

La théorie des cordes survivra-t-elle à l'un ou l'autre de ces changements ? Toutes les théories des cordes connues seront sans doute falsifiées, puisqu'elles dépendent fortement de la validité de la relativité restreinte. Mais existe-t-il une version de la théorie des cordes cohérente avec le premier ou le second type de faille ? Quelques théoriciens des cordes m'ont affirmé que, même si l'on observe que la relativité restreinte cesse de s'appliquer ou doit être modifiée, on pourrait encore inventer une forme de la théorie des cordes qui tienne compte de ces résultats. Il est possible qu'ils aient raison. Comme je l'ai dit, la théorie des cordes contient plusieurs champs non observés. Il existe de nombreuses façons de modifier le fond de la théorie des cordes de telle sorte qu'il y ait un état de repos privilégié et que la relativité du mouvement ne soit plus vraie. C'est peut-être de cette façon que l'on pourrait envisager la construction d'une version de la théorie des cordes qui serait en accord avec l'expérience.

Qu'en est-il pour la DSR ? Peut-il y avoir une version de la théorie des cordes compatible avec elle ? À ce jour, João Magueijo et moi sommes les seules personnes à avoir exploré cette question et les indications que nous avons trouvées ne nous permettent pas de trancher. Nous avons pu construire une théorie des cordes qui passe certains tests de consistance, mais nous n'avons pas réussi à trouver une réponse nette concernant les autres tests.

En conséquence, bien que toutes les versions connues de la théorie des cordes soient cohérentes avec la relativité restreinte, il est vrai que si la relativité restreinte est erronée, les théoriciens des cordes pourraient s'en arranger. Ce qui serait étrange, ce serait de penser que cela renforce leur cause. C'est de mon point de vue plutôt une indication que la théorie des cordes est incapable de faire une prédiction quelconque, n'étant rien d'autre qu'une collection de théories différentes, une par fond spatio-temporel particulier. L'enjeu des observations du GLAST et d'Auger est la symétrie de l'espace et du temps. En théorie dépendante du fond, cet enjeu est décidé par le choix d'un fond. Tant que la théorie le permet, on peut obtenir toutes les réponses que l'on désire en choisissant un fond approprié. Cette situation diffère de manière spectaculaire de celle où nous pouvons obtenir des prédictions.

Que se passe-t-il avec les autres approches de la gravité quantique ? Celles-ci ont-elles prédit une faille de la relativité restreinte ? En théorie indépendante du fond, la situation est très différente, parce que la géométrie de l'espace-temps n'est pas spécifiée. Cette géométrie doit émerger en tant que conséquence de la solution de la théorie. L'approche de la gravité quantique indépendante du fond doit faire des prédictions véritables au sujet de la symétrie de l'espace et du temps.

Comme nous l'avons vu plus haut, si le monde a deux dimensions spatiales, alors nous savons quelle est la réponse. Il n'y a pas de liberté ; les calculs montrent que les particules se comportent en conformité avec DSR. Est-ce possible que la même chose soit vraie dans le monde réel, tridimensionnel ? Mon intuition est que oui, et nous possédons des résultats en gravité quantique à boucles qui en fournissent de bonnes indications, mais pas encore de preuves. Mon espoir le plus cher serait de voir cette question réglée rapidement, avant que les observations nous montrent la vérité. Il serait formidable d'avoir une prédiction véritable de la théorie de la gravité quantique et de pouvoir ensuite la falsifier dans une observation sans lecture équivoque. Une seule chose serait mieux encore : que l'observation confirme cette prédiction. Quoi qu'il en soit, on aura fait de la bonne science.

15
La physique après la théorie des cordes

Dans les deux chapitres précédents, nous avons montré qu'il y a de bonnes raisons de s'attendre à un progrès spectaculaire dans la recherche des lois de la nature. Des découvertes expérimentales surprenantes ont déjà conduit à une extension de la théorie de la relativité, qui elle-même a déjà permis des prédictions pour des expériences en cours. Que la relativité doublement restreinte soit correcte ou pas, elle est de toute manière une science véritable, parce que les expériences pourront confirmer ou réfuter ses prédictions principales.

Les théoriciens et les expérimentateurs dont j'ai décrit le travail dans les deux chapitres précédents ont déjà inauguré, en physique fondamentale, l'époque d'après la théorie des cordes. Dans ce chapitre, je vous propose donc une visite guidée de ce nouveau monde, en soulignant les idées et les développements les plus prometteurs. Quand on regarde au-delà de la théorie des cordes, on trouve une saine réapparition de la théorie fondamentale « à l'ancienne » : établie grâce à une réflexion difficile, concentrée, portant sur les questions de fond, consciente des avancées en physique expérimentale et en mathématiques. Dans toutes les disciplines voisines – la gravité quantique, les fondements de la physique quantique, la physique des particules élémentaires et la cosmologie –, les idées nouvelles et audacieuses évoluent main dans la main avec de nouvelles expériences fascinantes. Ces initiatives ont besoin d'être soutenues, sans quoi elles flétriront avant d'avoir donné leurs fruits ; pourtant, elles affichent déjà de grandes promesses.

Commençons par un domaine qui progresse rapidement : les approches de la gravité quantique qui intègrent – au lieu de l'écarter – la grande découverte d'Einstein que la géométrie de l'espace-temps est dynamique et contingente.

Nous savons maintenant qu'il ne suffit pas d'avoir une théorie des gravitons fabriqués à partir des cordes se tortillant dans l'espace. Nous avons besoin d'une théorie de *ce qui fait l'espace*, c'est-à-dire d'une théorie indépendante du fond. Comme je l'ai déjà expliqué, le succès de la relativité générale prouve que la géométrie spatiale n'est pas fixe. Au contraire, elle est dynamique et elle évolue dans le temps. Ceci est une découverte fondamentale que l'on ne peut pas négliger, et toute théorie future est obligée d'en tenir compte. La théorie des cordes ne le fait pas, et, par conséquent, si la théorie des cordes est correcte, alors il

doit y avoir, derrière elle, une autre théorie, plus fondamentale, qui serait indépendante du fond. En d'autres termes, que la théorie des cordes soit correcte ou non, il nous reste de toute manière une théorie indépendante du fond à découvrir, celle de la gravité quantique.

Heureusement, grâce au travail accompli depuis vingt ans, nous savons beaucoup de choses sur la façon de construire une telle théorie. Les approches indépendantes du fond de la gravité quantique décollèrent en 1986, seulement deux ans après la première révolution des cordes. Le catalyseur fut la publication d'un article du physicien théoricien Abhay Ashtekar, à l'époque à l'université de Syracuse, contenant une reformulation de la relativité générale, qui a beaucoup simplifié les équations[18]. Il est intéressant qu'Ashtekar ait obtenu ses résultats en exprimant la théorie einsteinienne sous une forme très proche de celle des théories de jauge – théories qui soutiennent le modèle standard de la physique des particules.

Malheureusement, la majorité des théoriciens des cordes n'ont pas prêté attention aux remarquables progrès accomplis dans le domaine de la gravité quantique depuis vingt ans, et ces deux disciplines se sont développées séparément. Pour quelqu'un d'extérieur à la physique théorique, ce manque de communication peut paraître bizarre. Pour moi aussi, et c'est pourquoi je me suis investi personnellement pour le dépasser, en expliquant à chacune des deux communautés les mérites de l'autre. Je ne peux pas affirmer avoir réussi, mais, le fait que beaucoup de scientifiques travaillant sur le même problème mais dans des perspectives différentes aient du mal à communiquer entre eux est définitivement un des éléments qui m'a amené à croire que la physique est en crise – et à œuvrer au mieux pour l'en sortir, dans la mesure de mes moyens.

L'atmosphère qui règne dans le domaine de la gravité quantique est différente de celle qui règne dans le domaine de la théorie des cordes. Il n'y a pas de théories dominantes, ni de tendances à la mode. Il y a seulement quelques très bons chercheurs qui travaillent dur sur quelques idées, toutes étroitement liées. Il y a quelques directions que l'on explore, mais il y a aussi quelques idées unificatrices qui donnent à la discipline une cohérence globale.

La principale idée unificatrice est facile à formuler : *ne commencez pas par un espace donné, ni par quelque chose qui se déplace dans l'espace*. Au contraire, commencez par quelque chose qui possède non pas une structure spatiale, mais une structure purement quantique. Si la théorie est bonne, alors l'espace en émergera comme une représentation de quelques propriétés moyennes de la structure – tout comme la température émerge comme représentation du mouvement moyen des atomes.

Ainsi, beaucoup de théoriciens de la gravité quantique croient qu'il existe un niveau plus profond de la réalité, où l'espace n'existe pas (et avec cette croyance, ils avancent l'idée d'indépendance du fond à son point logique extrême). Puisque la théorie des cordes exige, pour avoir un sens, l'existence d'une théorie indépendante du fond, beaucoup de théoriciens des cordes ont accepté cette idée. Dans un sens limité, si la forme forte de la conjecture de Maldacena (voir chapitre 9) est avérée, la géométrie à neuf dimensions émergera à partie d'une géométrie fixe à trois dimensions. Par conséquent, il n'est guère étonnant d'entendre Edward Witten dire, comme il l'a fait dans un exposé récent à

l'Institut Kavli de physique théorique de l'université de Californie à Santa Barbara, que « la plupart des théoriciens des cordes soupçonnent que l'espace soit un "phénomène émergent", dans le langage des théoriciens de la matière condensée[19] ».

Certains théoriciens des cordes ont enfin commencé à faire valoir ce point, et on ne peut qu'espérer qu'ils suivront cette voie en étudiant les résultats concrets déjà obtenus. Mais en fait, la plupart des chercheurs en gravité quantique ont en tête quelque chose de plus radical que la conjecture de Maldacena.

Le point de départ n'a rien à voir avec la géométrie. Ce que nous, qui travaillons en gravité quantique, voulons faire comprendre en disant que l'espace est émergent, c'est que le continuum de l'espace est une illusion. Tout comme l'aspect lisse, apparent, de l'eau ou de la soie cache une matière composée d'atomes discrets, nous soupçonnons que l'aspect lisse de l'espace n'est pas réel, mais qu'il émerge comme l'approximation de quelque chose de fondamentalement différent, qu'il est en réalité composé de briques de construction dénombrables. Dans certaines approches, il est simplement présupposé que l'espace est fait d'» atomes » discrets ; dans d'autres, ce présupposé est rigoureusement dérivé, en combinant les principes de la relativité générale et de la théorie quantique.

Une autre idée unificatrice est l'importance de la *causalité*. En relativité générale classique, la géométrie d'espace-temps dicte à la lumière sa voie de propagation. Puisque rien ne peut se déplacer plus vite que la lumière, une fois que l'on sait comment la lumière se propage, on peut déterminer quels effets ont pu être causés par un événement donné. Étant donné deux choses qui se sont produites, la première ne peut être la cause de la seconde sauf si une particule s'est propagée de la première à la seconde, à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière. Ainsi, la géométrie de l'espace-temps contient de l'information à propos des liens de causalité entre événements. On appelle cette information la « structure causale de l'espace-temps ».

Que la géométrie spatio-temporelle détermine les relations causales n'est cependant pas la seule possibilité. L'inverse aussi peut être vrai : les relations causales pourraient déterminer la géométrie de l'espace-temps, car la plupart des informations dont nous avons besoin pour définir la géométrie de l'espace-temps sont fixées une fois que l'on sait comment voyage la lumière.

Il est facile de parler d'un espace ou d'un espace-temps qui émergent de quelque chose de plus fondamental, mais ceux qui ont essayé d'élaborer ce concept ont découvert qu'il n'était pas facile de le réaliser en pratique. Les premières approches échouèrent, probablement parce qu'on ignorait le rôle que joue la causalité dans l'espace-temps. Aujourd'hui, beaucoup de ceux qui travaillent en gravité quantique pensent que *la causalité est elle-même fondamentale* – et qu'elle a un sens même à ce niveau où la notion d'espace disparaît[20].

Les approches les plus réussies, à ce jour, de la gravité quantique utilisent la combinaison de ces trois idées fondamentales : que l'espace-temps est *émergent*, que la description la plus fondamentale est *discrète* et que cette description fait intervenir la *causalité* de façon cruciale.

L'étude actuelle de la gravité quantique est en quelque sorte analogue à la physique d'il y a un siècle, quand les scientifiques croyaient aux atomes mais ne connaissaient pas les détails de la structure atomique. Malgré cela, Ludwig Boltzmann, Einstein et les autres ont pu comprendre beaucoup à propos de la matière, ne sachant d'elle qu'une chose : elle est faite d'atomes. Supposant une taille approximative pour ces atomes, ils ont prédit des effets observables. De façon similaire, nous avons été capables de dériver des résultats importants à partir de modèles simples, basés seulement sur les principes d'émergence, de causalité et de structure discrète. Étant donné notre ignorance des détails, ces modèles ne sont que les présupposés les plus simples possibles à propos des unités discrètes de l'espace-temps, dont ils prédisent certaines conséquences. Le plus réussi de ces modèles est celui de Renate Loll et Jan Ambjørn et s'appelle « triangulations dynamiques causales[21] ». Ce nom est probablement trop technique pour une approche dont la stratégie est pourtant très simple. Elle consiste à représenter les processus causaux fondamentaux par des éléments constructifs, comme des blocs de meccano dans les jeux d'enfants. On peut aussi l'appeler « approche Buckminster Fuller ». L'idée de base est que la géométrie de l'espace-temps ressemble à une pile de plusieurs de ces blocs, et chacun représente un processus causal élémentaire. Il existe quelques règles simples qui régissent la façon dont les blocs peuvent s'empiler, et une formule simple qui donne la probabilité quantique pour chaque modèle d'espace-temps quantique.

Une des règles qu'imposent Loll et Ambjørn est que chaque espace-temps quantique doit être perçu comme une séquence des espaces possibles qui se succèdent dans le temps, comme le tic-tac d'une horloge universelle. La coordonnée temporelle étant, selon eux, arbitraire, comme en relativité générale, le fait que l'histoire du monde puisse être perçue comme une succession de géométries dans le temps ne l'est pourtant pas.

Étant donné cette contrainte, plus quelques règles simples, Loll et Ambjørn ont découvert des indications substantielles que l'espace-temps classique, avec ses trois dimensions d'espace plus une de temps, émergerait à partir d'un simple jeu d'empilement de blocs. C'est la meilleure indication que l'on possède en théorie quantique de la gravitation indépendante du fond que l'espace-temps classique à trois dimensions spatiales peut émerger d'un monde purement quantique, en se fondant uniquement sur l'aspect discret de ce monde et sur la causalité. En particulier, Ambjørn et d'autres ont démontré que si on n'oblige pas ce monde à respecter la causalité, l'espace-temps classique n'en émerge jamais.

Une des conséquences de ces résultats est que certaines parmi les idées les plus largement admises à propos de la gravité quantique se révèlent fausses. Ainsi, à une certaine époque, Stephen Hawking et d'autres affirmaient que la structure causale n'est pas essentielle et qu'on pourrait faire les calculs en gravité quantique tout en ignorant les différences entre espace et temps – différences qui existent même en théorie de la relativité – et en considérant le temps juste comme s'il était une dimension spatiale de plus. C'est ce que Hawking entendait lorsqu'il proposa, quelque peu mystérieusement, dans son livre *Une brève histoire du temps*, que le temps soit « imaginaire ». Les résultats de Loll et Ambjørn invalident cette idée.

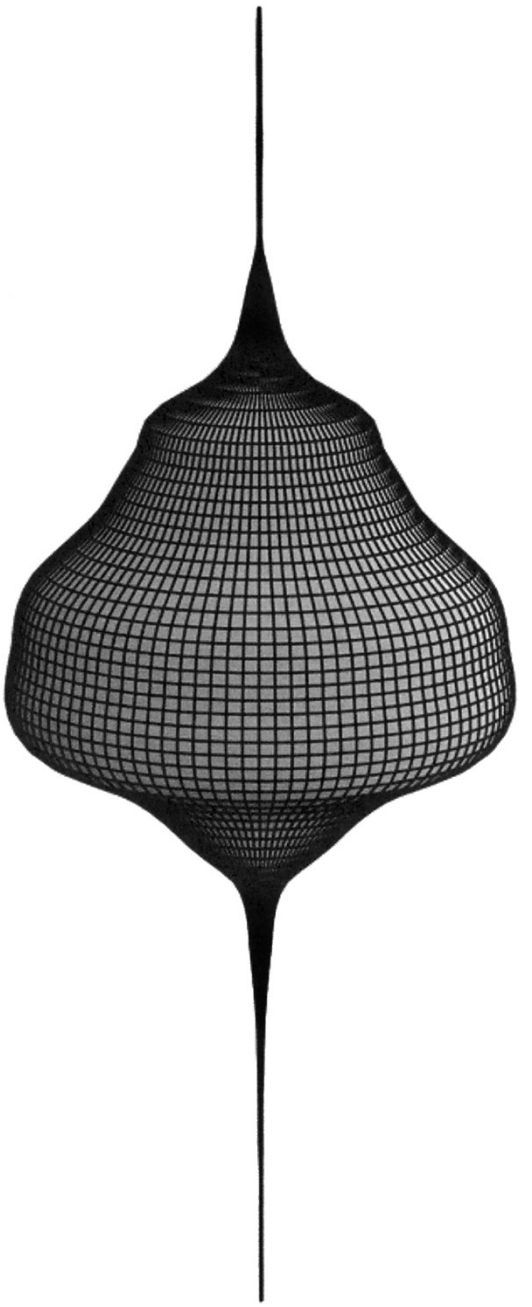


Figure 14. Un modèle d'univers quantique selon la triangulation dynamique causale.
L'image représente l'histoire d'un modèle d'univers à trois dimensions spatiales, dont l'une est représentée horizontalement, et une dimension temporelle, représentée verticalement.

Avant que ce travail ne soit accompli, d'autres chercheurs avaient exploré l'idée d'éléments fondamentaux de l'espace-temps faisant intervenir la causalité, mais personne n'avait trouvé de théorie qui permette à l'espace-temps classique d'émerger. Une formulation pareille, appelée « théorie des ensembles causaux », postule que les éléments fondamentaux de l'espace-temps sont, simplement, les événements purs, dont les seuls attributs sont des listes d'autres événements qui ont pu les causer et qu'ils ont pu causer eux-

mêmes. Ces idées sont encore plus simples que les modèles de Loll et Ambjørn, parce qu'elles ne requièrent pas de succession globale dans le temps. Mais jusqu'à ce jour, on n'a pas trouvé de moyen de démontrer que l'espace-temps émerge de cette théorie.

Cependant, on peut compter un autre triomphe majeur de la théorie des ensembles causaux : sa capacité apparente à résoudre le problème de la constante cosmologique. En présupposant simplement que le monde classique émerge à partir de la théorie des ensembles causaux, un physicien de l'université de Syracuse, Rafael D. Sorkin, a prédit avec ses collaborateurs que la constante cosmologique serait aussi petite que ce qui a été observé. Autant que je sache, c'est à ce jour la seule solution non ambiguë au problème de la constante cosmologique. Tout comme l'attractivité d'une théorie fondée sur des principes aussi simples, cette solution transforme à elle seule cette recherche en un programme qui mérite d'être soutenu.

Le physicien mathématicien anglais Roger Penrose a aussi proposé une approche de l'espace-temps quantique, fondée, elle, sur un principe qui reconnaît que les relations de causalité jouent un rôle fondamental. Cette approche s'appelle « théorie des twisteurs ». Penrose et quelques adhérents à la théorie travaillent sur ce sujet depuis les années 1960. Cette théorie est fondée sur un renversement total de notre manière habituelle de penser les événements dans l'espace-temps. Traditionnellement, on perçoit ce qui se passe comme des *données* primaires, et les relations entre ce qui se passe comme secondaires. Ainsi, les événements sont réels, tandis que les relations causales entre eux ne sont que les propriétés des événements. Penrose a découvert qu'on pouvait inverser cette façon de voir les choses, c'est-à-dire qu'on pouvait prendre les processus causaux élémentaires pour des éléments fondamentaux et, ensuite, définir les événements en termes de coïncidences entre les processus causaux. En particulier, on peut ainsi construire un nouvel espace, consistant en tous les rayons de lumière de l'espace-temps. Puis on peut traduire toute la physique dans le langage de cet espace des rayons lumineux. Le résultat est une construction d'une extrême élégance, que Penrose a appelée « espace des twisteurs ».

Pendant les vingt premières années qui ont suivi la proposition initiale de Penrose, la théorie des twisteurs s'est rapidement développée. De façon surprenante, on s'est aperçu à plusieurs occasions que beaucoup d'équations de la physique pouvaient être réécrites dans l'espace des twisteurs, comme si l'on pouvait considérer les rayons de lumière comme l'élément le plus fondamental, l'espace et le temps n'étant qu'un aspect des relations entre eux. C'était également un pas en avant dans l'unification, car les équations décrivant les divers types de particules prennent la même forme simple quand on les formule en termes de l'espace des twisteurs. La théorie des twisteurs réalise partiellement cette idée d'une émergence de l'espace-temps à partir d'une autre structure. Les événements de notre espace-temps s'avèrent alors être des surfaces suspendues dans l'espace des twisteurs. La géométrie de notre espace-temps émerge, elle aussi, des structures de l'espace des twisteurs.

Mais il existe des problèmes dans cette façon de représenter le monde. Le principal est que l'espace des twisteurs ne peut être compris qu'en l'absence de la théorie quantique. Et bien que l'espace des twisteurs soit très différent de l'espace-temps, c'est aussi une structure géométrique lisse. Personne ne sait à quoi pourrait ressembler un espace des twisteurs

quantique. On n'a pas encore déterminé si une notion comme « théorie quantique des twisteurs » a un sens, ni si l'espace-temps peut en émerger.

Dans les années 1970, le centre du développement de la théorie des twisteurs était Oxford, et je faisais partie de ceux, nombreux, qui y ont passé du temps. J'y ai découvert une atmosphère vraiment grisante, un peu comme celle qui serait plus tard commune aux centres de recherche sur la théorie des cordes. On admirait profondément Penrose, comme on a admiré Edward Witten. J'ai rencontré de jeunes physiciens et mathématiciens de grand talent qui croyaient en la théorie des twisteurs avec une passion sans égale. Certains d'entre eux sont devenus d'éminents *mathématiciens*.

La théorie des twisteurs a sans doute mené à d'importantes avancées en mathématiques. Elle a permis de mieux appréhender quelques-unes des équations centrales de la physique, y compris les équations principales de la théorie de Yang-Mills, à la base du modèle standard de la physique des particules. La théorie des twisteurs nous a également fourni une façon de comprendre un certain ensemble de solutions de la théorie de la relativité générale. Ces avancées ont contribué de manière importante à plusieurs développements futurs, dont la gravité quantique à boucles.

Mais la théorie des twisteurs, à ce jour, ne s'est pas transformée en une approche viable de la gravité quantique ; principalement, parce qu'elle n'a pas trouvé de méthode pour incorporer une grande partie de la relativité générale. Toutefois, Penrose et quelques collègues n'y ont pas renoncé. Et quelques théoriciens des cordes, y compris Witten, ont récemment commencé à travailler sur la théorie des twisteurs, apportant à l'espace des twisteurs des méthodes nouvelles qui l'ont rapidement fait progresser. Il semble que ces nouvelles méthodes n'aident pas – autant que l'on sache – à développer une théorie quantique de la gravitation à partir de la théorie des twisteurs, mais elles promettent une révolution dans l'étude des théories de jauge – ce qui constitue une preuve, s'il en était encore besoin, que ceux qui, ces dernières années, ont négligé la théorie des twisteurs, avaient tort.

Roger Penrose n'est pas le seul mathématicien de premier plan à inventer sa propre approche de la gravité quantique. Peut-être le plus grand des mathématiciens vivants – et certainement le plus drôle – à avoir fait de même est Alain Connes, fils d'un policier marseillais, qui travaille à Paris. J'aime beaucoup discuter avec Alain. Parfois, je ne comprends pas ce qu'il dit, mais je le quitte toujours avec la tête qui tourne, en raison de la profondeur de ces idées et de l'absurdité de ces blagues. (Celles-ci sont très souvent interdites aux moins de dix-huit ans, même quand elles parlent de trous noirs ou de vicieuses variétés de Calabi-Yau.) Une fois, il a démoli un exposé au cours d'un colloque sur la cosmologie quantique, en insistant pour que nous nous levions chaque fois que l'Univers était mentionné afin de manifester notre respect pour Lui. Mais même si je ne comprends pas toujours ce que dit Alain, lui, me comprend toujours ; il fait partie de ces gens qui réfléchissent à une telle vitesse qu'ils peuvent terminer vos propres phrases et améliorent inévitablement ce que vous étiez sur le point de dire. En même temps, il est tellement à l'aise et a tellement confiance en lui et en ses idées qu'il est tout sauf un compétiteur ; au contraire, il est naturellement intéressé par les idées des autres.

L'approche d'Alain de la gravité quantique a consisté à revenir aux fondements et à inventer des mathématiques nouvelles qui unifieraient parfaitement les structures mathématiques de la géométrie et de la théorie quantique. Ce sont les mathématiques mentionnées au chapitre 14, appelées « géométrie non commutative ». Le mot « non commutatif » se réfère au fait que les quantités, en théorie quantique, sont représentées par des objets qui ne commutent pas : AB n'y est pas égal à BA. La non-commutativité de la théorie quantique est étroitement liée au fait que l'on ne peut pas mesurer en même temps la particule et l'impulsion d'une particule. Quand deux quantités ne commutent pas, on ne peut pas connaître simultanément leurs valeurs. Cela semble aller à l'encontre de ce qui est essentiel en géométrie, car celle-ci commence par l'image visuelle d'une surface. La capacité même de former une image visuelle implique une définition aboutie et une connaissance complète. Construire une version de quelque chose comme une géométrie qui soit fondée sur des choses que l'on ne peut pas mesurer simultanément, a été une avancée vraiment profonde. Ce qui est particulièrement attirant dans cette démarche est sa promesse d'unifier quelques domaines des mathématiques, tout en se posant comme les mathématiques parfaites pour une prochaine avancée de la physique.

La géométrie non commutative a montré son utilité dans quelques approches de la gravité quantique, y compris la théorie des cordes, la relativité doublement restreinte et la gravité quantique à boucles. Mais aucune de ces approches n'est à la hauteur de la conception originelle de Connes qu'il continue d'élaborer avec quelques autres mathématiciens, principalement en France[22]. Les différentes versions de la géométrie non commutative apparaissent dans d'autres programmes fondés sur des idées superficielles, telle que transformer les coordonnées spatiales et temporelles en quantités non commutatives. L'idée de Connes est beaucoup plus profonde : c'est l'unification au niveau des fondements de l'algèbre et de la géométrie. Elle ne pouvait qu'être inventée par quelqu'un qui ne se contente pas d'exploiter les mathématiques, mais réfléchit également de façon stratégique et créative sur la structure de la connaissance mathématique et son avenir.

Comme les vieux théoriciens des twisteurs, les quelques adeptes que Connes a pu recruter sont tous des convaincus. Pour un colloque à l'université de Penn State sur les différentes approches de la gravité quantique, Alain a recommandé un physicien français célèbre, assez âgé aussi, du nom de Daniel Kastler. Ce *gentleman* s'est cassé la jambe dans un accident de vélo une semaine avant le colloque, mais il a rampé hors de l'hôpital et s'est fait amener à l'aéroport de Marseille, en arrivant au colloque juste au bon moment pour ouvrir les travaux par la déclaration suivante : « Il n'y a qu'un seul Alain et je suis son messager. » Les théoriciens des cordes ne sont pas les seuls à compter parmi eux de vrais adeptes, mais les mathématiciens non commutatifs ont sûrement un plus grand sens de l'humour.

Une réussite de la géométrie non commutative est de mener directement au modèle standard de la physique des particules. Comme l'ont découvert Alain et ses collègues, si l'on prend la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell et si on la décrit dans la plus simple géométrie non commutative possible, alors surgit le modèle de Weinberg-Salam qui unifie l'électromagnétisme avec la force nucléaire faible. En d'autres termes, les inte-

ractions faibles, ainsi que les champs de Higgs, apparaissent automatiquement et dans une forme correcte.

Rappelez-vous (voir chapitre 2) qu'une manière de savoir si une unification particulière est réussie ou pas, est d'avoir immédiatement le sentiment de concorde entre l'idée nouvelle et la nature. Le fait que la bonne unification des interactions électromagnétiques et faibles suit la version la plus simple de la conception de Connes est presque irrésistible ; le genre de choses qu'on attendait de la théorie des cordes, mais qui ne se sont pas produites.

Il existe un autre ensemble de démarches qui se concentrent sur l'émergence de l'espace-temps classique et de la physique des particules à partir d'une structure discrète sous-jacente. Ce sont des modèles développés par les physiciens de la matière condensée, tels que Robert Laughlin de l'université Stanford, Grigori Volovik de l'université technologique d'Helsinki et Xiao-Gang Wen du MIT. Récemment, de jeunes chercheurs en gravité quantique, tel Olaf Dreyer, ont donné un coup de main à ces recherches. Lesdits modèles sont primitifs, mais ils manifestent le fait que certains aspects de la relativité restreinte, comme l'universalité de la limite supérieure de la vitesse, peuvent émerger des types particuliers des systèmes quantiques discrets. Volovik et Dreyer ont ainsi affirmé de façon provocante que le problème de la constante cosmologique était résolu – parce que, pour commencer, il n'y en avait jamais eu. Selon eux, l'idée même que le problème puisse exister est erronée ; une conséquence du fait de prendre trop au sérieux les théories dépendantes du fond. Selon Volovik et Dreyer encore, l'erreur vient de la division des variables de base de la théorie, dont certaines sont traitées comme un fond gelé et d'autres comme des champs quantiques[23]. S'il s'avère qu'ils ont raison sur ce point, c'est le résultat le plus important fourni par la gravité quantique depuis plusieurs années.

Toutes les approches que je viens de décrire sont indépendantes du fond. Quelques-unes commencent par présupposer que l'espace-temps est composé d'éléments constructifs discrets. On pourrait vouloir aller plus loin que cela et montrer que l'aspect discret de l'espace et du temps n'est qu'une conséquence de la conjonction des principes de la théorie quantique et de la théorie de la relativité. C'est exactement ce qu'accomplit la *gravité quantique à boucles*. Celle-ci a commencé avec la reformulation révolutionnaire, par Ashtekar en 1986, de la théorie de la relativité générale d'Einstein. Nous avons découvert que, sans y ajouter de présupposés, mais tout simplement en réécrivant la théorie einsteinienne en termes d'un nouvel ensemble de variables, on pouvait en dériver précisément ce qu'est l'espace-temps quantique.

L'idée clef derrière la gravité quantique à boucles est en fait une vieille idée dont nous avons déjà discuté au chapitre 7, qui vise à décrire un champ, comme le champ électromagnétique, directement en termes de lignes de champ. (Le mot « boucle » vient du fait que, en l'absence de matière, les lignes de champs peuvent revenir sur elles-mêmes, formant ainsi une boucle.) Telle était la vision de Holger Nielsen, Alexander Polyakov et Kenneth Wilson et c'est une des idées qui ont conduit à la théorie des cordes, qui n'est en gros qu'un développement de cette idée visionnaire dans le contexte d'un fond spatio-temporel fixe. La gravité quantique à boucles la reprend et l'élabore dans une théorie entièrement indépendante du fond.

Ce travail fut rendu possible par la grande découverte d'Ashtekar que la relativité générale pouvait être exprimée dans un langage semblable au langage du champ de jauge. La métrique de l'espace-temps s'avère quelque chose d'analogue au champ électrique. Quand nous avons essayé de traiter les lignes de champ correspondantes de la manière dictée par la mécanique quantique, nous étions forcés d'effectuer ce traitement sans fond, parce qu'il n'y en avait aucun : les lignes de champ décrivaient déjà la géométrie de l'espace. Une fois qu'elles ont été transformées selon les prescriptions quantiques, il n'y avait plus de géométrie classique en jeu. Nous avons donc dû réinventer la théorie quantique des champs pour travailler sans métrique sous-jacente. Pour la résumer en deux mots, cette tâche a nécessité les contributions de plusieurs personnes avec des compétences physiques et mathématiques très variées, mais nous y sommes parvenus. Le résultat, c'est la gravité quantique à boucles.

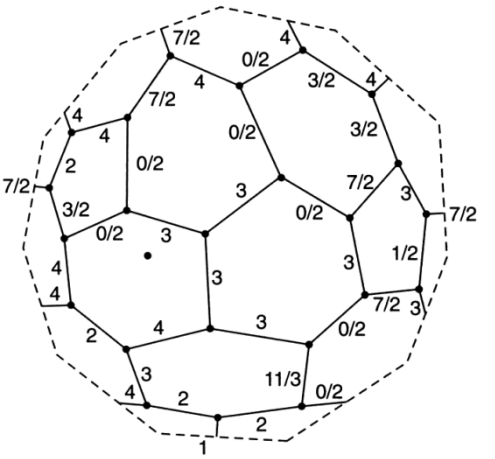
L'image du monde qui en résulte est très simple. Une géométrie quantique est un certain type de graphe (voir figure 15). Un espace-temps quantique est une séquence d'événements où le graphe évolue à travers les changements locaux de sa structure. Cette procédure est au mieux illustrée par les exemples de la figure 16.

La théorie a eu beaucoup de succès. On l'a démontrée finitaire, en trois sens :

1. La géométrie quantique est finitaire et les aires et les volumes viennent en quantités discrètes.
2. Quand on calcule les probabilités pour que les géométries quantiques évoluent en histoires différentes, celles-ci sont toujours finies (au moins dans une formulation de la théorie qu'on appelle « modèle de Barrett-Crane »).
3. Quand la théorie est couplée à une théorie de la matière, comme le modère standard de la physique des particules, les infinis qui y apparaissent habituellement sont tous rendus finis ; c'est-à-dire que, sans gravité, on serait obligé de recourir à une procédure spéciale pour isoler les expressions infinies et les rendre inobservables ; mais avec la gravité, il n'existe simplement pas d'expressions infinies.

Il faut souligner qu'il n'y a aucune incertitude quant à la vérité des affirmations précédentes. On a prouvé les résultats principaux de la gravité quantique à boucles à l'aide de théorèmes rigoureux.

Le plus grand défi pour la gravité quantique à boucles fut, dès son début, d'expliquer la façon dont émerge l'espace-temps classique. Au cours des dernières années, des progrès majeurs ont été accomplis dans la résolution de ce problème, en partie grâce à l'invention de nouvelles procédures d'approximation qui montrèrent que la théorie possède des états quantiques décrivant les univers où la géométrie est classique au bon degré d'approximation. Un pas important a été accompli l'année dernière par Carlo Rovelli, qui travaille au Centre de physique théorique de Marseille, et par ses collègues, qui ont découvert des indications fortes que la gravité quantique à boucles prédit que deux masses s'attirent l'une vers l'autre précisément de la même manière que celle dictée par la loi de Newton[24]. Ces résultats indiquent également que dans des énergies basses, la théorie possède des gravitons, et la gravité quantique à boucles est donc une véritable théorie de la gravitation.



Figures 15. Un réseau de spin, qui est l'état de la géométrie quantique dans la gravité quantique à boucles et les théories qui lui sont liées. Des quanta de volume sont associés aux nœuds et des quantas de surface sont associés aux arêtes.

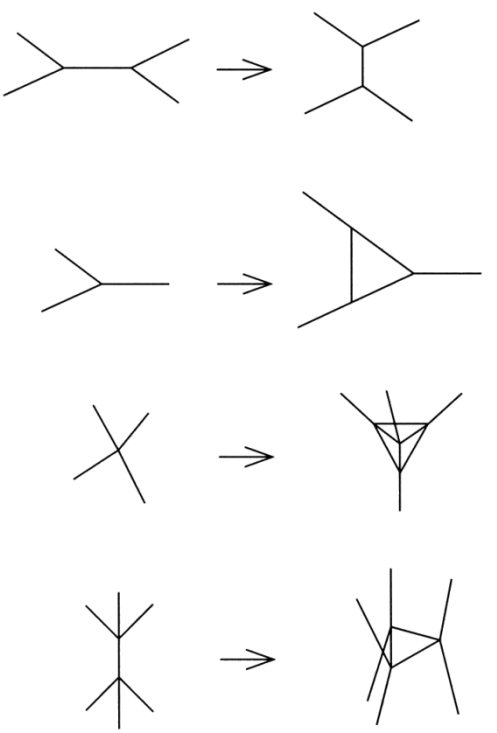


Figure 16. Les réseaux de spin évoluent dans le temps selon une série de changements locaux tels que ceux représentés ici.

Beaucoup d'efforts sont actuellement investis dans l'application de la gravité quantique à boucles aux phénomènes du monde réel. Il existe une description précise des horizons des trous noirs, qui fournit l'expression correcte de l'entropie. Ces résultats sont en accord

avec les anciennes prédictions de Bekenstein et Hawking, à savoir que les trous noirs ont une entropie et une température (voir chapitre 6). Au moment où j'écris ces lignes, un des thèmes de recherche vraiment en pointe parmi les thésards et les post-docs est la prévision des modifications du résultat de Hawking pour la thermodynamique des trous noirs, qui – s'ils sont mesurés à l'occasion de futures études sur les trous noirs physiques – pourraient valider ou falsifier la gravité quantique à boucles.

La gravité quantique à boucles a aussi servi de fondement pour les modèles qui permettent d'étudier les géométries à dépendance temporelle forte à l'intérieur des trous noirs. Quelques calculs portent à croire que les singularités à l'intérieur des trous noirs disparaissent. Ainsi, le temps peut continuer au-delà du point où, selon la relativité générale classique, il doit s'achever. Mais où va-t-il ? La réponse semble être que le temps va vers les régions de l'espace-temps fraîchement créées. La singularité est remplacée par ce qu'on appelle un « rebond spatio-temporel ». Juste avant le rebond, la matière à l'intérieur du trou noir se contractait. Juste après le rebond, elle est en expansion, mais dans une région nouvelle qui n'existait pas auparavant. Ceci est un résultat très satisfaisant, car il confirme une spéculation antérieure de Bryce DeWitt et John Archibald Wheeler. Les mêmes techniques ont été utilisées pour étudier ce qui se passe au tout début de l'univers. De nouveau, les théoriciens découvrirent des indications selon lesquelles la singularité est éliminée, ce qui signifierait que la théorie prédit que l'univers a existé avant le Big Bang.

L'élimination de la singularité dans les trous noirs donne une réponse naturelle au paradoxe de l'information des trous noirs, celui de Hawking. Comme je l'ai dit au chapitre 6, l'information n'est pas perdue ; elle va vers une région nouvelle de l'espace-temps.

Le contrôle que nous avons obtenu sur le tout début de l'univers, grâce à la gravité quantique à boucles, a rendu possible un calcul des prédictions d'observations réelles. Récemment, deux post-docs de l'Institut Perimeter, Stefan Hofmann et Oliver Winkler, ont ainsi pu en dériver des prédictions précises concernant des effets de gravité quantique qu'on pourrait bientôt observer dans le fond diffus cosmologique[25].

Les théoriciens eux aussi avaient du travail, puisqu'ils tentaient de prédire ce que nous pourrions voir dans les expériences Auger et GLAST, qui toutes deux doivent nous montrer si la relativité restreinte tient, ou ne tient plus, aux énergies proches de Planck. Un grand avantage des approches indépendantes du fond est leur capacité de fournir des prédictions pour de telles expériences. Le principe de relativité des repères inertiels est-il validé ou brisé ? Est-il modifié, comme dans les théories DSR ? Comme je l'ai déjà souligné, aucune théorie dépendante du fond ne peut réaliser une prédiction véritable concernant ces expériences, parce qu'on y a déjà répondu à la question en choisissant un fond. En particulier, la théorie des cordes présuppose que la relativité des repères inertiels reste vraie sous la forme originelle, proposée par Einstein dans sa théorie de la relativité restreinte. Seuls les approches indépendantes du fond peuvent fournir une prédiction sur le destin des principes de la relativité restreinte, car les propriétés de l'espace-temps classique y émergent en tant que solutions d'un problème dynamique.

La gravité quantique à boucles semble pouvoir faire une prédiction valide. Dans les modèles où l'espace n'a que deux dimensions, elle l'a déjà faite : elle prédit que DSR est vraie.

Il existe des indications que la même prédiction tient pour notre monde à trois dimensions spatiales, mais, à ce jour, nous n'avons aucune preuve convaincante de ce fait.

Qu'en est-il pour les autres grands problèmes, comme l'unification des particules et des forces ? Jusqu'à récemment, on a pensé que la gravité quantique à boucles ne pouvait pas nous apprendre grand-chose à propos de problèmes autres que celui de la gravité quantique. On pouvait introduire la matière dans la théorie, et ses bons résultats ne seraient pas modifiés. Si nous voulions, nous pouvions aussi inclure dans la théorie le modèle standard de la physique des particules, tout entier – ou n'importe quel autre modèle de la physique des particules que l'on souhaitait étudier –, mais on ne croyait pas que la gravité quantique à boucles pourrait apporter une contribution particulièrement intéressante au problème de l'unification. Récemment, nous avons compris que nous avions tort sur ce point. La gravité quantique à boucles possède déjà, en son sein, les particules élémentaires et des résultats récents suggèrent que celles-ci relèvent précisément de la physique des particules correcte : celle du modèle standard.

L'année dernière, Fotini Markopoulou a proposé une nouvelle manière d'envisager l'émergence de la géométrie spatiale à partir d'une théorie plus fondamentale. Markopoulou est une jeune physicienne qui travaille en gravité quantique et qui me surprend souvent avec ses idées peu vraisemblables qui finalement s'avèrent exactes ; cette idée-ci était parmi ses meilleures. Au lieu de se demander directement si la géométrie de l'espace-temps quantique peut donner un espace-temps classique, elle a proposé une méthode différente, fondée sur l'identification et l'étude du mouvement des particules dans la géométrie quantique. Son idée était qu'une particule peut être une espèce d'excitation émergente de la géométrie quantique, qui se déplace à travers cette géométrie à peu près de la même manière qu'une onde traverse un corps solide ou un liquide. Pourtant, pour produire une physique déjà connue, on doit pouvoir décrire ces particules émergentes en tant que pures particules quantiques, tout en ignorant la géométrie quantique à travers laquelle elles voyagent[26].

Normalement, quand une particule est en interaction avec son environnement, l'information sur son état est dissipée dans celui-ci : on dit que la particule *décohère*. Il est difficile d'empêcher la décohérence ; c'est pourquoi la construction d'un ordinateur quantique est si difficile : son efficacité dépend de façon critique du fait que la particule doit être dans un état quantique pur. Les scientifiques qui construisent les ordinateurs quantiques ont ainsi inventé des approches nouvelles pour pouvoir garder le système dans un état pur même quand il se trouve en contact avec l'environnement. En travaillant en collaboration avec des experts dans ce domaine, Markopoulou a compris que leurs percées théoriques s'appliquaient aussi à la façon dont une particule quantique pourrait émerger d'un espace-temps quantique. Elle a réalisé que, pour tirer des prédictions de la gravité quantique, on pouvait identifier une telle particule quantique et montrer que celle-ci se déplace comme si tout se passait dans un espace ordinaire. Selon cette analogie, l'environnement est un espace-temps quantique qui, étant dynamique, se modifie continuellement. La particule quantique doit se déplacer à travers lui comme s'il était un fond fixe, non dynamique.

En utilisant ces idées, Markopoulou et ses collaborateurs ont pu démontrer que quelques théories de la gravité quantique indépendantes du fond possèdent des particules émergentes. Mais que sont ces particules ? Correspondent-elles à quelque chose qui a été observé ?

Au premier abord, ce problème paraît difficile parce que les géométries quantiques, prédites par la gravité quantique à boucles, sont très compliquées. Les états des particules sont associés aux graphes dans l'espace tridimensionnel. L'espace est un fond, mais il n'a pas de propriétés autres que sa topologie ; toute l'information sur les mesures géométriques – comme les longueurs, les aires et les volumes – provient des graphes. Mais puisqu'il faut bien dessiner les graphes dans un espace, la théorie possède aussi beaucoup d'informations supplémentaires qui semblent ne rien avoir à faire avec la géométrie. Il en est ainsi à cause du nombre infini de façons dont les extrémités des graphes peuvent se nouer, se rejoindre et se tresser dans l'espace à trois dimensions.

Quelles sont les significations de ces nœuds, liens et tresses des graphes ? Cette question est ouverte depuis 1988. Depuis, on n'en avait pas la moindre idée. La découverte de Markopoulou que les particules émergent comme structures topologiques rendait urgente sa résolution. Finalement, elle est arrivée de façon complètement inattendue...

Au printemps dernier, je lisais un article d'un jeune physicien des particules australien du nom de Sundance O. Bilson-Thompson. Dans cet article, il présentait un tressage simple de rubans qui capturait, de façon remarquablement précise, la structure des modèles de préons en physique des particules dont j'ai parlé au chapitre 5. (Rappelez-vous que ce sont les modèles qui postulent des particules hypothétiques, appelées préons, comme constituants fondamentaux des protons, des neutrons et des particules qui, selon le modèle standard, sont élémentaires.) Dans ce modèle, un préon est un ruban et les différentes espèces de préons correspondent aux rubans entortillés à gauche, à droite, ou pas entortillés du tout. Trois rubans peuvent être tressés ensemble, et ces différentes façons d'agencer les rubans correspondent précisément aux diverses particules du modèle standard[27].

Dès que j'ai lu l'article, je sus que c'était l'idée qui nous manquait, car les tresses étudiées par Bilson-Thompson pouvaient toutes apparaître dans la gravité quantique à boucles. Cela signifie que les différentes manières de tresser et de nouer les extrémités des graphes dans l'espace-temps quantique ne sont rien d'autres que les diverses particules élémentaires. Ainsi, la gravité quantique à boucles n'est pas uniquement une théorie d'espace-temps – elle possède déjà, en son sein, la physique des particules élémentaires. Si l'on pouvait montrer rigoureusement comment les jeux de Bilson-Thompson se réalisaient dans la théorie, on aurait alors la *bonne* physique des particules élémentaires. J'ai demandé à Markopoulou si les tresses de Bilson-Thompson pouvaient être ses excitations cohérentes. Puis, nous avons invité Bilson-Thompson à collaborer avec nous, et après quelques faux départs, nous nous sommes aperçus que, en effet, l'argument tenait de bout en bout. En ajoutant quelques présupposés mineurs, nous avons trouvé un modèle de préons qui décrit le plus simple des états des particules dans une classe de théories de la gravité quantique[28].

Cela a soulevé beaucoup de questions et mon projet principal est maintenant d'y répondre. Il est trop tôt pour dire si le résultat fonctionne suffisamment bien pour fournir des prédictions sans équivoque des expériences prochainement réalisées au LHC, construit au CERN. Mais une chose est sûre. La théorie des cordes n'est plus la seule approche de la gravité quantique qui unifie les particules élémentaires. Les résultats de Markopoulou suggèrent que beaucoup de théories de gravité quantique indépendantes du fond contiennent des particules élémentaires en tant qu'états émergents. Et il existe au moins une théorie, la théorie de la gravité quantique à boucle, qui ne mène pas à un vaste paysage de théories possibles. Au contraire, elle a des chances de nous conduire à des prédictions uniques, que celles-ci soient en accord avec l'expérience ou pas. Plus important encore, cela pare au besoin de réviser la méthode scientifique en invoquant le principe anthropique, comme l'ont préconisé Leonard Susskind et d'autres (voir chapitre 11). La science « à l'ancienne » reprend l'avantage.

Nul ne peut douter qu'il *existe* des approches différentes aux cinq problèmes fondamentaux de la physique. Le domaine de la physique fondamentale, au-delà de la théorie des cordes, enregistre une croissance rapide, et ceci dans plusieurs directions en même temps, y compris – mais sans y être limité – les triangulations dynamiques causales et la gravité quantique à boucles. Comme dans tout domaine scientifique sain, il y a une vive interaction avec l'expérience et les mathématiques. Bien qu'il n'y ait pas autant de chercheurs (peut-être deux cents, tout compris) qui travaillent sur ces programmes de recherche que de chercheurs en théorie des cordes, cela fait néanmoins un nombre respectable de scientifiques pour affronter les problèmes fondamentaux dans les domaines scientifiques de premier plan. Les grandes percées du XX^{e} siècle ont été accomplies par bien moins d'hommes et de femmes que cela. Quand il s'agit de mener à bien une révolution scientifique, ce qui compte est la qualité de la pensée, et non la quantité de vrais adeptes.

Je veux cependant être clair sur un point : il n'y a rien dans cette nouvelle ambiance post-cordes qui exclut en soi l'étude de celles-ci. L'idée sur laquelle se fonde la théorie – la dualité des champs et des cordes – est également au centre de la gravité quantique à boucles. Ce qui a conduit à la crise actuelle en physique n'est pas cette idée centrale, mais un type particulier de réalisation qui se contraint aux théories dépendantes du fond – un contexte qui nous lie à des propositions risquées comme la supersymétrie et les dimensions supérieures. Il n'y a aucune raison pour lesquelles une approche différente de la théorie des cordes – celle qui sera plus en accord avec les points fondamentaux tels l'indépendance du fond et les problèmes de la théorie quantique – ne pourrait pas faire partie de la réponse ultime, mais pour le savoir, la théorie des cordes a besoin d'être élaborée dans une ambiance ouverte, où elle sera considérée comme une idée parmi d'autres, sans préjuger de son succès ou de son échec. Ce que l'esprit de la physique ne peut pas tolérer est précisément le préjugé que telle ou telle idée n'a qu'à réussir quelles que soient les preuves.

Bien qu'il existe aujourd'hui, parmi les théoriciens de la gravité quantique, la sensation excitante d'avancer, il s'est créé également une attente forte face au chemin qui reste à parcourir et qui nous apportera sûrement quelques surprises. Contrairement aux théoriciens des cordes à l'époque grisante des deux révolutions des supercordes, peu de chercheurs en

gravité quantique croient qu'ils ont mis la main sur la théorie ultime. Nous reconnaissons que l'accomplissement des approches de la gravité quantique, indépendantes du fond, est un pas nécessaire dans l'accomplissement de la révolution einsteinienne. Ils montrent qu'il peut y avoir un langage cohérent, mathématique et conceptuel, qui unifie la théorie quantique et la relativité générale. C'est un élément que la théorie des cordes n'a pas fourni : un cadre potentiel où pourrait être formulée une théorie qui résoudrait les cinq problèmes énumérés au chapitre 1. Mais nous sommes aussi à peu près sûrs que nous n'avons pas tout en main. Même en tenant compte des succès récents, aucun concept ne permet encore de poser le sceau de la vérité absolue.

Quand on regarde en arrière, on s'aperçoit d'un fait récurrent dans l'histoire de la physique : une fois que la bonne théorie est finalement proposée, elle triomphe rapidement. Les quelques bonnes idées d'unification viennent sous une forme irrésistible, simple et unique ; elles ne viennent pas comme des listes d'options à sélectionner ou de traits à ajuster. La mécanique newtonienne est définie par trois lois simples, la gravité newtonienne par une formule simple avec une seule constante. La relativité restreinte était complète dès sa découverte. Il est vrai qu'il nous fallut vingt-cinq ans pour élaborer une formulation complète de la mécanique quantique, mais, dès le début, ceci fut fait en rapport étroit avec l'expérimentation. Plusieurs articles centraux sur le sujet, depuis les années 1900, ont été écrits soit pour expliquer un résultat expérimental récent, soit pour faire une prédiction sans équivoque concernant une expérience qui allait être réalisée. La même chose est vraie dans le cas de la relativité générale.

Ainsi, toutes les théories qui ont triomphé ont eu des conséquences sur l'expérimentation, simples à déduire et testables dans les quelques années qui suivaient leur élaboration. Cela ne signifie pas qu'on peut résoudre exactement leurs équations – pour la plupart des théories, cela n'arrive jamais. Cela signifie que l'intuition physique a immédiatement entraîné la prédiction de phénomènes nouveaux.

Quoi qu'on dise au sujet de la théorie des cordes, de la gravité quantique à boucles et d'autres approches, celles-ci n'ont pas encore fourni de résultats sur ce plan-là. Leur excuse habituelle a été de dire que les expériences à ces échelles sont impossibles à réaliser – mais, comme nous l'avons vu, ce n'est pas le cas. Il doit donc y avoir une raison différente. Je crois, personnellement, qu'il y a quelque chose de fondamental qui nous échappe, peut-être un présupposé faux auquel nous croyons tous. S'il en est ainsi, alors il nous faut isoler ce présupposé erroné et le remplacer par une idée nouvelle.

Qu'est-il donc, ce présupposé ? Mon intuition est qu'il fera intervenir deux choses : les fondements de la mécanique quantique et la nature du temps. Nous avons déjà parlé de la première ; je trouve encourageant le fait que, récemment, des idées nouvelles aient été proposées au sujet de la mécanique quantique, motivées par l'étude de la gravité quantique. Mais je soupçonne très fort que la clef se trouve du côté du temps. De plus en plus ai-je la sensation que la théorie quantique et la relativité générale ont toutes les deux profondément tort quant à la nature du temps. Il ne suffit pas de les mettre ensemble. Il y a ici un problème différent, qui nous fera revenir, peut-être, à l'origine de la physique.

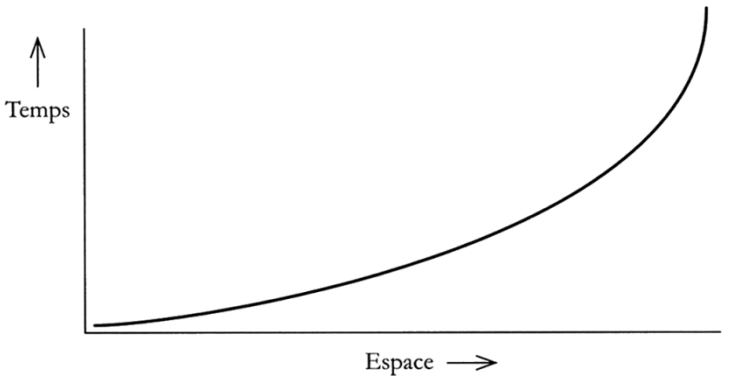


Figure 17. Depuis Descartes et Galilée, un processus se déroulant dans le temps est représenté par une courbe, la dimension supplémentaire représentant le temps.
Cette « spatialisation » du temps est utile, mais elle est contestable, car elle représente un monde statique et immuable – un ensemble gelé de relations mathématiques éternelles.

Au début du XVII[e] siècle, Descartes et Galilée ont fait une découverte remarquable : on pouvait dessiner un graphe où un axe représentait l'espace et l'autre le temps. Le mouvement à travers l'espace devenait ainsi une courbe sur ce graphe (voir figure 17). En procédant de cette façon, le temps est représenté comme s'il n'était encore qu'une autre dimension spatiale. Le mouvement est gelé, et toute l'histoire du mouvement constant et de la modification permanente nous est présentée comme quelque chose d'immobile, qui ne varie jamais. Si j'avais à deviner (et deviner est la seule chose que je sais faire pour gagner ma vie), cette scène serait celle du crime.

Il faut trouver une manière de *dégeler* le temps – de le représenter sans le transformer en espace. Je n'ai pas la moindre idée de comment faire. Je ne peux pas imaginer de mathématiques qui ne représentent pas le monde comme gelé pour l'éternité. Il est horriblement difficile de représenter le temps, et c'est pourquoi il y a de bonnes chances que cette représentation soit la pièce manquante.

Une chose est claire : je ne peux arriver nulle part si, dans ma réflexion sur ce problème, je me restreins à la théorie des cordes. Puisque celle-ci est limitée à la description des cordes et des branes qui se déplacent sur les fonds spatio-temporels géométriques fixes, elle n'offre rien à qui voudrait changer la manière de penser la nature du temps ou la théorie quantique. Les approches indépendantes du fond offrent un meilleur point de départ, parce qu'elles ont déjà dépassé l'image classique de l'espace-temps. Elles sont simples à définir et facile à manipuler. Il y a un avantage supplémentaire : les mathématiques qu'elles utilisent sont plus proches de celles utilisées par certains mathématiciens pour explorer les idées radicales sur la nature du temps – une sous-discipline de la logique appelée « théorie des topoi ».

Une chose dont je suis sûr concernant cette question d'une représentation du temps qui ne soit pas une dimension d'espace, est qu'elle surgit dans d'autres domaines, depuis la biologie théorique jusqu'à l'informatique et le droit. Dans son effort pour secouer quelques nouvelles idées, le philosophe Roberto Mangabeira Unger et moi-même avons ré-

cemment organisé un petit colloque, à l'Institut Perimeter, qui rassembla les visionnaires de chacun de ces domaines pour une discussion sur le temps. Ces deux jours furent parmi les plus fascinants que j'ai vécus depuis des années[29].

Je n'en dirai pas plus, car je veux aborder une autre question. Imaginez une personne jeune, avec des ambitions intellectuelles, possédant un esprit original et impatient, qui souhaiterait réfléchir en profondeur sur les cinq grands problèmes. Étant donné notre échec à résoudre définitivement au moins un de ces problèmes, je ne puis imaginer la raison pour laquelle cette personne voudrait se limiter à travailler sur un et un seul des programmes de recherche existant actuellement. Il est évident que si la théorie des cordes ou la gravité quantique à boucles étaient, en soi, des réponses suffisantes, nous le saurions déjà. Celles-ci peuvent servir de point de départ, elles peuvent faire partie de la réponse, elles peuvent aussi nous apprendre des leçons nécessaires. Mais la bonne théorie doit comprendre d'autres éléments, que notre personne jeune et ambitieuse est peut-être la mieux placée et la plus qualifiée pour chercher.

Que ma génération a-t-elle légué à ces jeunes scientifiques ? Des idées et des techniques qu'ils peuvent vouloir ou ne pas vouloir utiliser, et l'histoire édifiante d'un succès partiel dans plusieurs directions, dont le résultat est un échec global dans l'achèvement du travail qu'Einstein commença voici un siècle. La pire chose que nous puissions faire serait de contraindre les jeunes chercheurs à travailler encore sur nos propres idées. La question que je vais aborder dans la dernière partie de ce livre est celle que je me pose tous les matins : faisons-nous tout ce qui est en notre pouvoir pour soutenir et encourager les jeunes scientifiques – et donc aussi nous-mêmes – à s'affranchir de nos recherches de ces trente dernières années et chercher la théorie qui résoudra les cinq grands problèmes de la physique ?

IV

Apprendre de l'expérience

16
Comment combattre la sociologie ?

Dans la dernière partie de ce livre, je veux revenir sur les questions posées dans l'introduction. Pourquoi, malgré tant d'efforts fournis par des milliers de scientifiques de grand talent issus des meilleures formations, la physique fondamentale a-t-elle fait si peu de progrès décisifs ces derniers vingt-cinq ans ? Étant donné l'apparition de nouvelles directions très prometteuses, que faudrait-il mettre en œuvre pour que le taux de progression rattrape celui des deux siècles qui ont précédé l'année 1980 ?

Une façon d'exprimer cela est de dire qu'il n'existe pas un seul travail de physique théorique des particules élémentaires, réalisé ces trente dernières années, qui mériterait sans aucune hésitation un prix Nobel. En effet, les conditions d'attribution du Nobel en physique exigent que la découverte soit déjà vérifiée par l'expérience. Certes, l'expérience pourrait montrer que les idées comme la supersymétrie ou l'inflation sont vraies, et si tel est le cas, leurs inventeurs mériteront le Nobel. Mais on ne peut pas affirmer, à ce jour, que la preuve expérimentale de n'importe quelle hypothèse physique allant au-delà du modèle standard de la physique des particules soit assurée.

La situation était très différente quand je me suis inscrit en thèse en 1976. Il était absolument clair que le modèle standard, mis au point trois ans plus tôt, était une avancée décisive. Il en a toujours existé des preuves expérimentales substantielles, et encore plus de preuves allaient bientôt surgir. Il n'y avait aucun doute sérieux sur le fait que ses inventeurs recevraient, tôt ou tard, le prix Nobel. Et effectivement, ils l'ont reçu.

Rien de tel aujourd'hui. Au cours des vingt-cinq dernières années, beaucoup de prix ont été accordés à des travaux de physique théorique, mais pas le Nobel. On ne donne pas le Nobel pour récompenser quelqu'un d'avoir été intelligent ou pour couronner une réussite ; on le donne pour avoir révélé la vérité.

Je ne dis pas cela pour nier qu'il y a eu de grandes avancées dans chacun des programmes de recherche. Certains disent qu'il y a plus de scientifiques en activité aujourd'hui qu'il y en a eu dans toute l'histoire des sciences. Sans doute, est-ce le cas en physique ; aujourd'hui, dans les départements de physique d'une grande université, il doit y avoir plus de professeurs que dans toute l'Europe du début du XX^{e} siècle ; pourtant, c'est au début du XX^{e} siècle que la plupart des grandes découvertes furent réalisées. Tous ces scien-

tifiques actuels font leur travail, et une grande partie de ce travail est très sophistiquée techniquement. Le niveau d'habileté technique des jeunes physiciens théoriciens est de nos jours beaucoup plus élevé qu'une ou deux générations auparavant. Ces jeunes gens sont obligés d'avoir des connaissances beaucoup plus étendues, mais ils parviennent néanmoins à les maîtriser.

Cependant, si l'on considère la situation actuelle selon les critères des deux siècles précédant l'année 1980, il semble bien que le train du progrès en théorie des particules élémentaires ait ralenti.

Nous en avons déjà exposé des explications faciles. Ce n'est pas un manque de données : il existe un grand nombre de nouveaux résultats pour exciter l'imagination des théoriciens. Ce n'est pas qu'il faille attendre longtemps pour que les théories soient testées : rarement plus de dix ans séparent les prédictions de phénomènes nouveaux prédits par une théorie nouvelle et leur confirmation. Ce n'est pas le manque d'efforts : beaucoup plus de chercheurs travaillent aujourd'hui sur les problèmes de physique fondamentale que tout au long de l'histoire de la discipline. Sans doute est-il également impossible de blâmer un manque de talent.

Dans les chapitres précédents, j'ai avancé l'hypothèse que ce qui a échoué n'est pas tant une théorie particulière, mais plutôt un style particulier de recherche. Si l'on passe du temps, d'abord, dans la communauté des théoriciens des cordes, puis, dans la communauté des scientifiques qui travaillent sur différentes approches de la gravité quantique indépendantes du fond, on ne peut pas ne pas être frappé par la grande divergence de style et de valeur qui sépare les deux communautés. Cette divergence reflète un véritable gouffre en physique théorique, dont les racines remontent à plus de cinquante ans.

Le style du monde de la gravité quantique est l'héritage de ce qu'on a appelé, jadis, la communauté de la relativité. Celle-ci avait pour leaders les élèves et les associés d'Einstein, puis leurs propres élèves : des gens comme Peter Bergmann, Joshua Goldberg et John Archibald Wheeler. Les valeurs au cœur de cette communauté étaient le respect des idées individuelles et des programmes de recherches, une attitude de soupçon pour tout ce qui est à la mode, la confiance donnée uniquement aux arguments mathématiquement rigoureux et la conviction que les problèmes clefs sont étroitement liés aux questions fondamentales posées sur la nature de l'espace, du temps et du quantique.

Le style de la communauté de la théorie des cordes, au contraire, est un prolongement de la culture de la théorie des particules élémentaires. Celle-ci a toujours affiché plus d'effronterie, d'agressivité et d'esprit de compétition qui poussèrent les théoriciens à rivaliser pour répondre plus vite aux développements nouveaux (qui étaient d'habitude, avant 1980, d'origine expérimentale) et de se méfier des questions philosophiques. Ce style a supplanté celui plus réfléchi et plus philosophique caractéristique d'Einstein et des inventeurs de la théorie quantique lorsque le centre de la vie scientifique a migré vers l'Amérique ; le centre d'intérêt intellectuel est alors passé de l'exploration de nouvelles théories fondamentales à leur application.

La science a absolument besoin de styles intellectuels différents pour pouvoir analyser des problèmes de types différents. Mon hypothèse est que la théorie des cordes ne marche

pas comme nous le souhaitions parce qu'elle s'est développée avec le style de recherche de la physique des particules élémentaires, qui n'est pas adapté à la découverte de nouveaux cadres théoriques. Le style qui a conduit au succès du modèle standard est aussi difficile à poursuivre sans connexion avec l'expérimentation. Pendant quelque temps, ce style compétitif, guidé par la mode, a fonctionné grâce à l'abondance de découvertes expérimentales, mais il échoua quand il n'en resta rien, sauf les points de vue et les goûts individuels de quelques scientifiques éminents.

Quand j'ai commencé mes études de physique, les deux styles de recherche se portaient bien. Il y avait beaucoup plus de physiciens des particules élémentaires que de spécialistes de la relativité, mais il y avait aussi assez de place pour ces derniers. Par contre, il n'y en avait pas beaucoup pour ceux qui voulaient développer leurs propres solutions aux questions fondamentales sur l'espace, le temps et le monde quantique, mais quand même assez pour soutenir ceux, peu nombreux, qui avaient de bonnes idées. Depuis, bien que nous ayons davantage besoin du style de recherche des relativistes, leur place dans le monde universitaire a beaucoup régressé en raison de la domination de la théorie des cordes et d'autres vastes programmes de recherche. À l'exception d'un seul groupe de recherche de l'université d'État de Pennsylvanie, aucun maître de conférence spécialisé sur les approches à la gravité quantique autres que la théorie des cordes ou les dimensions supérieures n'a été recruté par une université de recherche américaine, depuis les années quatre-vingt-dix environ.

Pourquoi le style qui est le moins adapté au problème est-il devenu dominant dans toute la physique, à la fois en Amérique et à l'étranger ? C'est une question qui appartient aux sociologues, mais nous devons y répondre si nous voulons apporter des suggestions constructives pour rendre à notre discipline sa vitalité de jadis.

Pour replacer ce problème dans son contexte, nous devons revenir sur les quelques changements qui ont partout pénétré le paysage académique et auxquels tout jeune chercheur doit s'adapter s'il désire poursuivre sa carrière scientifique.

Le changement le plus frappant est qu'il y a maintenant beaucoup plus de pression sur les jeunes chercheurs, ce qui les pousse à entrer en compétition pour être remarqués par des scientifiques plus âgés et très influents. La génération qui mena la science américaine à son apogée, maintenant proche de la retraite, aurait pu, elle aussi, se faire concurrence pour décrocher les postes de professeurs dans les universités d'élite et les instituts de recherche, mais il n'y avait pas autant de pression si vos aspirations se limitaient à un poste de professeur dans une université quelconque, qui néanmoins vous donnait la liberté de poursuivre votre propre travail. Dès années 1940 et jusqu'aux années 1970, la croissance des universités fut exponentielle, et il n'était pas exceptionnel qu'un jeune scientifique ait plusieurs offres de postes en même temps, directement après sa soutenance de thèse. J'ai rencontré beaucoup de collègues de la vieille génération qui n'ont jamais dû postuler pour un poste universitaire.

Les choses sont désormais différentes. Depuis le début des années 1970, les universités ne se développent plus, tandis que les professeurs embauchés autrefois continuent de former des doctorants selon un taux moyen stable, ce qui signifie qu'il y a surproduction de

nouveaux docteurs ès-sciences en physique et en d'autres disciplines. Par conséquent, la compétition est féroce pour obtenir les postes universitaires à tous les niveaux de la hiérarchie académique. On attache aussi beaucoup plus d'importance au recrutement du personnel payé par les agences qui financent la recherche. Ceci limite considérablement les possibilités pour les chercheurs qui souhaitent poursuivre leurs propres projets, et non pas ceux élaborés par les scientifiques plus âgés. Il y a donc moins de lieu où peut se réfugier un chercheur créatif pour y trouver la sécurité d'un poste universitaire, tout en continuant à développer ses idées risquées et originales.

Les universités sont maintenant beaucoup plus professionnalisées que ce qu'elles étaient. Bien que le corps des professeurs ne s'élargisse plus, on a enregistré une croissance remarquable du nombre et du pouvoir des administrateurs. Ainsi, dans les modalités de recrutement, on donne moins d'importance au jugement des professeurs confirmés qu'aux mesures de réussite statistiques, telles que le financement et les niveaux de citations universitaires. Tout cela rend encore plus hasardeuses la décision d'un jeune chercheur d'aller à contre-courant de la tendance générale et de se dédier à l'invention de projets nouveaux.

Dans nos tentatives d'évaluer impartialement le travail de nos collègues, nous, professeurs, avons tendance, presque comme un réflexe, à préférer ceux qui sont d'accord avec nous et à pénaliser ceux en désaccord. Même quand nous essayons de dépasser les enjeux de la politique universitaire, nous tombons souvent dans un autre piège, celui d'évaluer nos collègues sur la base de caractéristiques unidimensionnelles. Au cours des réunions d'enseignants et dans nos discussions informelles, nous parlons de qui est « bien » et de qui ne l'est pas, comme si nous savions réellement ce que cela voulait dire. Le travail de toute une vie peut-il être réduit à « Marie n'est pas aussi bien que Jean » ? Tout se passe comme si les résultats ne demandant qu'une certaine dose d'intelligence et un dur labeur avaient plus de valeur que ceux qui approfondissent la pensée et excitent l'imagination. Les modes intellectuelles ont beaucoup trop d'importance, et ceux qui les ignorent s'engagent sur des voies académiques risquées.

Il m'est arrivé une fois de travailler sur un projet avec un général en retraite, qui était directeur d'une université pour officiers de l'armée, devenu ensuite consultant dans le monde des affaires. Il m'a parlé de sa frustration quand il avait essayé de travailler avec les universités. Je lui ai demandé quel était, selon lui, le problème. Il m'a répondu : « Il y a une chose simple mais essentielle que nous apprenons à chaque officier de la Marine, mais qu'aucun administrateur universitaire que j'ai rencontré n'a l'air de connaître : *Il y a une différence énorme entre le* management *et le* leadership. L'un peut gérer l'obtention des approvisionnements, mais l'autre doit mener les soldats dans la bataille. » Je suis d'accord avec lui. À mon époque, je vois beaucoup plus de *management* dans les universités que de *leadership*.

Bien sûr, ce problème n'est pas spécifique à la science. La vitesse de l'innovation dans les programmes d'études et dans les méthodes pédagogiques est absolument médiévale. Toute proposition de changement doit être approuvée par le corps des professeurs et en général la majorité d'entre eux ne voit aucun problème dans la façon d'enseigner qu'ils pratiquent depuis des décennies. J'ai tôt appris dans mon parcours jusqu'où peut aller la résistance

des universités au changement. J'ai eu la chance d'étudier dans une université où, en première année, on enseignait la physique quantique. C'est rare. Bien que la physique quantique ait remplacé la physique newtonienne voici quatre-vingts ans, la plupart des collèges et des universités d'Amérique du Nord placent toujours l'enseignement de la mécanique quantique dans la troisième année d'étude, et même alors, elle est enseignée seulement à qui se spécialise en physique. Puisque je savais comment organiser un cours de mécanique quantique en première année, j'ai proposé de le faire lorsque j'étais moi-même thésard à Harvard. Un jeune professeur, Howard Georgi, était d'accord pour le co-enseigner avec moi, mais le doyen de la faculté a opposé son veto. Cela n'avait rien à voir avec la proposition elle-même, comme il me l'a expliqué, c'était parce qu'elle n'avait pas eu l'aval du comité d'enseignants. « Si on permet à chaque professeur de faire ce qu'il veut, m'a-t-il dit, on aura un chaos total dans l'éducation. » Je ne suis pas sûr qu'un chaos dans l'éducation soit une si mauvaise idée ; en tout cas, Harvard n'a toujours pas de cours de mécanique quantique en première année.

C'est un fait malheureux que le nombre d'étudiants américains diplômés de physique décline depuis des dizaines d'années. On aurait pu croire que cela réduirait la compétition pour les postes de professeurs de physique, mais non, ce n'est pas le cas, puisque le déclin des diplômes au niveau de la licence et de la maîtrise s'est trouvé plus que compensé par le nombre croissant de doctorats reçus par des étudiants brillants et ambitieux venant de pays en voie de développement. La même situation s'observe dans d'autres pays avancés.

J'ai parfois eu l'occasion – en tant que membre d'un comité professoral à Yale constitué pour étudier ce phénomène, mais aussi grâce à l'intérêt pour ce sujet que je nourris depuis – de poser aux jeunes diplômés qui abandonnent la physique la question de savoir pourquoi ils le font. Une raison souvent invoquée est que les programmes d'enseignement en physique sont ennuyeux : en première année, on répète ce qu'on a déjà appris à l'école et on ne voit pointer aucun thème fascinant comme la théorie quantique, la cosmologie, les trous noirs, etc. Dans l'espoir que cela pourrait aider à inverser la tendance d'une diminution du nombre d'étudiants en physique, j'ai proposé à chacune des universités où je travaillais de faire de la mécanique quantique un cours de première année. Chaque fois on me disait non, quoique deux universités m'aient permis d'enseigner de petites démonstrations de théorie quantique. Celles-ci ont connu un certain succès, et quelques-uns parmi les étudiants qui y ont assisté poursuivent maintenant eux-mêmes des carrières de physicien.

Mon but n'est pas d'argumenter pour une réforme des programmes universitaires, mais cet exemple montre que les universités ne remplissent pas leur mission de moteurs pour l'innovation, même si l'enjeu n'est rien de plus que la modernisation d'un programme d'étude qui a quatre-vingts ans de retard sur la science.

Les scientifiques de tous bords se lamentent de la vitesse à laquelle avancent leurs domaines. Je connais quelques biologistes et physiciens expérimentateurs qui se plaignent amèrement d'opportunités ratées à cause de scientifiques seniors, qui contrôlent leurs départements et qui ont perdu l'audace et l'imagination qu'ils possédaient sans doute quand ils étaient eux-mêmes thésards. Les bonnes idées ne sont pas prises au sérieux lorsqu'elles

proviennent de gens au statut académique « inférieur » ; inversement, les idées de scientifique d'un statut académique élevé sont souvent prises trop au sérieux.

On ne peut pas analyser ces dysfonctionnements sans explorer la sociologie qui les a produits. Si nous, physiciens, ambitionnons d'expliquer les lois fondamentales de la nature, nous devons pouvoir analyser rationnellement la sociologie du monde académique et les prises de décisions contre-productives qui le gangrènent.

Il faut mentionner que le mot « sociologie » est plus employé ces temps-ci par les théoriciens des cordes que par toutes les autres communautés de scientifiques que je connais. Ce mot semble être un raccourci pour « le point de vue de la communauté ». Dans les discussions avec les jeunes théoriciens des cordes sur l'état du problème, on les entend souvent dire des choses comme : « Je crois en la théorie, mais je déteste la sociologie. » Si on ajoute un commentaire sur l'étroitesse des positions présentées aux colloques de la théorie des cordes ou sur la succession rapide des thèmes à la mode, un théoricien des cordes dira qu'il est d'accord et répondra : « Cela ne me plaît pas, mais c'est juste la sociologie. » Plus d'un ami m'a donné un conseil en ajoutant ceci : « La communauté a décidé que la théorie des cordes était correcte et tu n'y peux rien. Tu ne peux pas te battre contre la sociologie. »

Un vrai sociologue vous dira que pour comprendre comment fonctionne une communauté, il faut explorer les relations de pouvoir. Qui a le pouvoir et sur qui, et comment ce pouvoir est-il exercé ? La sociologie des sciences n'est pas une force mystérieuse ; elle se réfère à l'influence que les scientifiques seniors, mieux établis, ont sur les carrières des jeunes chercheurs. Nous, scientifiques, ressentons un malaise à discuter de ce thème, parce qu'il nous force à envisager que l'organisation de la science puisse ne pas être totalement objective et rationnelle. Après y avoir réfléchi pendant longtemps, je suis ainsi convaincu que nous devons discuter de la sociologie de la physique théorique car elle a un effet négatif non négligeable sur la progression de la discipline. Même si la majorité des théoriciens des cordes sont des gens honnêtes, qui poursuivent leur travail avec les meilleures intentions, certains aspects de la sociologie de cette discipline paraissent aberrants quand on les compare aux idéaux de la communauté scientifique au sens large. Ces aspects ont produit de véritables pathologies dans la méthodologie de la physique théorique, qui la ralentissent. La question n'est pas de savoir si la théorie des cordes vaut la peine d'être étudiée ou soutenue, mais pourquoi la théorie des cordes, malgré la pénurie de prédictions expérimentales, a monopolisé les ressources disponibles pour la recherche en physique fondamentale et, par conséquent, coupé les pieds à l'exploration d'autres approches affichant des promesses comparables aux siennes. Il semble également que le progrès en théorie des cordes a été ralentie par la sociologie, qui limite le champ des questions ouvertes à l'exploration et exclut les chercheurs imaginatifs et indépendants indispensables à tout progrès.

Il y a toujours eu un champ dominant à l'intérieur de la physique théorique. À une époque, c'était la physique nucléaire, puis la physique des particules élémentaires. La théorie des cordes est l'exemple le plus récent. Il se peut que la communauté des physiciens soit organisée de telle sorte qu'il y aura toujours un champ dominant. Si c'est vrai, la question est de savoir pourquoi.

La première chose que voit quelqu'un d'extérieur au domaine, au sujet de la communauté de la théorie des cordes, est son extraordinaire confiance en soi. En tant que témoin de la première révolution des supercordes, en 1984, je me souviens du sentiment de triomphe avec lequel on a accueilli la nouvelle théorie. « Ça sera fini d'ici douze à dix-huit mois », me disait Dan Friedan, une des jeunes stars du domaine. « Tu ferais mieux de nous rejoindre pendant qu'il reste encore quelque chose à faire en physique théorique. » Ce n'est qu'une des nombreuses affirmations entendues, selon lesquelles l'histoire allait bientôt se terminer.

L'histoire n'est bien sûr pas terminée. Mais à travers les hauts et les bas qu'a connus la théorie, beaucoup sont restés absolument certains de sa vérité aussi bien que de leur supériorité sur ceux qui ne voulaient pas ou n'étaient pas capables de travailler sur la théorie des cordes. Pour plusieurs d'entre eux, particulièrement les jeunes qui ne se souvenaient pas de l'époque où la physique était différente de celle qu'ils connaissaient, il était incompréhensible qu'un physicien de talent, étant donné l'occasion, ne choisisse pas de devenir théoricien des cordes.

Bien évidemment, cette attitude a dégoûté les physiciens des autres champs. Voici les réflexions de JoAnne Hewett, physicienne des particules à Stanford Linear Accelerator Center, exprimées sur son blog :

> Je trouve l'arrogance de certains théoriciens des cordes stupéfiante, même selon les critères des physiciens. Certains croient vraiment que tous les théoriciens d'autres domaines sont des scientifiques d'ordre inférieur. On le voit partout dans les lettres de recommandation qu'ils écrivent pour les leurs, et d'ailleurs certains d'entre eux me l'ont dit en face... La théorie des cordes [est perçue comme] tellement importante qu'on devrait la pratiquer aux dépens de toute autre théorie. On en a deux manifestations : premièrement, on a toujours recruté les théoriciens des cordes sur des postes universitaires dans des proportions démesurées qui ne correspondaient pas nécessairement à leurs aptitudes ; deuxièmement, les jeunes théoriciens des cordes ont une mauvaise formation en physique des particules. Littéralement, certains ont du mal à nommer les particules fondamentales de la nature. Ces deux phénomènes m'inquiètent en ce qui concerne l'avenir à long terme de notre discipline[1].

L'arrogance que décrit le docteur Hewett est une des caractéristiques des théoriciens des cordes présentes depuis le début. Subrahmanyan Chandrasekhar, probablement le plus grand astrophysicien du XX^e^ siècle, aimait beaucoup raconter l'histoire de sa visite à Princeton au milieu des années 1980, durant laquelle il fut félicité de son récent prix Nobel. Au dîner, il était assis à côté d'un jeune homme très sérieux. Comme les physiciens le font souvent pour entamer une conversation, Chandrasekhar lui a demandé : « Sur quoi travaillez-vous maintenant ? » La réponse fut : « Je travaille sur la théorie des cordes, la plus grande avancée en physique du XX^e^ siècle. » Ensuite, le jeune théoricien a conseillé à Chandra de renoncer à ce sur quoi il était en train de travailler et de venir travailler en théorie des cordes, parce que, sans cela, il courait le risque d'être aussi obsolète que ceux qui, dans les années 1920, n'ont pas immédiatement adhéré à la théorie quantique.

« Jeune homme », répondit Chandra, « j'ai connu Werner Heisenberg. Je peux vous assurer que Heisenberg n'était pas assez malpoli pour dire à qui que ce soit d'arrêter son tra-

vail pour travailler sur la théorie quantique. Et, certainement, il n'aurait jamais eu l'insolence de suggérer à quelqu'un qui a obtenu son doctorat il y a cinquante ans qu'il court le risque de devenir obsolète. »

Tous ceux qui passent leur temps avec les théoriciens des cordes se trouvent régulièrement confrontés à ce genre d'attitude immodérément confiante. Quel que soit le problème dont on discute, il y a une alternative qui n'apparaît jamais (sauf si elle est introduite pas un étranger) : que la théorie pourrait simplement être fausse. Si la discussion en vient au fait que la théorie des cordes prédit le paysage et, par conséquent, ne fait pas de prédictions concrètes, alors quelques théoriciens des cordes nous chanteront qu'il faut modifier le sens de ce qu'est la science.

Certains théoriciens des cordes préfèrent croire que les arcanes de la théorie sont trop complexes pour être comprises par des êtres humains, au lieu d'admettre la possibilité que la théorie pourrait simplement être fausse. Un texte récent sur un blog dédié à la physique formule ceci avec élégance :

> On ne peut pas s'attendre à ce qu'un chien comprenne la mécanique quantique, et il se pourrait bien que nous soyons en train d'atteindre la limite de ce que les hommes sont capables de comprendre à propos de la théorie des cordes. Peut-être existe-t-il des civilisations plus avancées, aux yeux desquelles nous paraissons aussi intelligents que le sont les chiens à nos yeux, et peut-être ces civilisations ont-elles suffisamment bien élaboré la théorie des cordes pour pouvoir passer à une théorie encore meilleure[2].

En effet, les théoriciens des cordes semblent sans problème croire que la théorie des cordes doit être vraie tout en reconnaissant qu'ils n'ont pas la moindre idée de ce qu'elle est réellement. En d'autres termes, la théorie des cordes subsumera tout ce qui viendra après elle. La première fois que j'ai entendu ce point de vue exprimé, j'ai pensé qu'on était en train de plaisanter, mais à la quatrième réitération je me suis convaincu que l'orateur était sérieux. On a même cité Nathan Seiberg, un célèbre théoricien de l'Institut d'études avancées, qui a affirmé dans un entretien récent (« avec un sourire ») que « s'il y a quelque chose [au-delà de la théorie des cordes], alors on l'appellera théorie des cordes[3] ».

De même nature est le sentiment de supériorité et le manque de considération pour ceux qui travaillent sur des approches alternatives aux problèmes que la théorie des cordes prétend résoudre. En effet, les théoriciens des cordes sont habituellement désintéressés, et souvent ignorants, de tout ce qui ne porte pas le label « théorie des cordes ». Contrairement à la pratique des réunions de spécialistes de la gravité quantique, aux colloques importants consacrés à la théorie des cordes, on n'invite jamais les scientifiques qui travaillent sur des approches rivales à venir exposer leurs résultats. Cela n'aboutit qu'à renforcer les affirmations des théoriciens des cordes selon lesquelles leur théorie est la seule qui fournisse des résultats probants en gravité quantique. Le mépris des approches alternatives va parfois jusqu'au dédain. Dans un colloque récent, un éditeur de Cambridge University Press m'a confié qu'un théoricien des cordes lui avait dit qu'il ne proposerait plus jamais de publier ces écrits dans cette maison, parce que celle-ci avait publié un livre sur la gravité quantique à boucles. Ce genre de choses n'est pas aussi rare qu'il le devrait.

Les théoriciens des cordes ont bien conscience de leur position dominante dans le monde de la physique et la plupart d'entre eux ont l'air de croire qu'ils la méritent – si la théorie elle-même ne le justifie pas, qu'autant de gens intelligents l'explorent doit certainement suffire. Si l'on pose à un expert des questions de détails à propos d'une des affirmations de la théorie des cordes, on risque d'être méprisé et traité avec une légère curiosité comme quelqu'un qui, sans aucune raison, a choisi le mauvais chemin, celui qui l'empêche de rejoindre le club. Certes, cela n'est pas vrai dans le cas des théoriciens des cordes dotés d'un esprit plus ouvert – mais il y a ce resserrement typique des muscles faciaux que j'ai trop souvent vu pour pouvoir l'ignorer, quand un jeune théoricien des cordes comprend brusquement qu'il (ou elle) est en train de parler avec quelqu'un qui ne partage pas tous les présupposés du clan[4].

Une autre caractéristique de la théorie des cordes est que, contrairement aux autres domaines de la physique, il existe une distinction on ne peut plus nette entre les théoriciens des cordes et les autres. Même si vous avez publié quelques articles sur la théorie des cordes, cela ne signifie pas nécessairement que vous serez reconnu par les théoriciens des cordes comme étant l'un des leurs. D'abord, je trouvais cela étonnant. Je poursuivais ma stratégie de travailler en même temps sur des approches différentes, en essayant de prendre de chacune ce qu'elle pouvait m'apporter. Je considérais aussi, au début, une bonne partie de mon travail, y compris sur la gravité quantique, comme l'analyse d'une importante question posée en théorie des cordes, à savoir comment en obtenir une formulation indépendante du fond. Éventuellement, quelques amis m'ont expliqué que pour pouvoir espérer appartenir à la communauté de la théorie des cordes – et, par conséquent, pour pouvoir espérer y contribuer de telle sorte que les autres s'en aperçoivent –, il me fallait travailler dur non seulement sur la théorie des cordes en général, mais aussi sur les problèmes particuliers qui intéressaient les théoriciens des cordes à ce moment. Je ne crois pas qu'il soit venu à l'esprit de mes amis qu'une telle situation pourrait compromettre mon jugement ou affecter ma liberté académique.

Je m'intéresse à beaucoup de choses et je suis toujours allé aux colloques des autres disciplines que la mienne. Mais ce n'est qu'aux colloques sur la théorie des cordes que les gens s'approchaient de moi pour me demander : « Et qu'est-ce que *vous* faites ici ? » Si j'expliquais que j'étais en train de travailler sur la théorie des cordes et que je voulais voir ce que faisaient les autres, on me répondait, sourcil narquoisement levé : « Mais n'êtes-vous pas ce type des *boucles* ? » Personne aux colloques sur l'astrophysique, la cosmologie, la biophysique ou le postmodernisme ne m'a jamais demandé ce que j'y faisais. Dans un colloque sur la théorie des cordes, un éminent théoricien des cordes, assis à côté de moi, m'a tendu la main en disant : « Bienvenue chez toi ! » Un autre a ajouté : « C'est sympa de te voir ici ! Nous étions inquiets pour toi. »

Chaque année, on n'explore pas plus de deux ou trois champs différents de la théorie des cordes. Ces champs varient d'une année sur l'autre et on peut estimer lesquels sont en vogue en regardant les titres des exposés présentés aux grands colloques annuels de la théorie des cordes. Souvent, au moins deux tiers des exposés concernent une ou deux directions, qui n'étaient pas fortement représentées deux ans plus tôt et seront quasiment ab-

sentes deux ans plus tard. Les jeunes chercheurs savent très bien qu'une carrière réussie demande qu'on suive deux ou plus de ces engouements, successivement et rapidement, pendant assez longtemps pour qu'on leur donne un post-doc correct et ensuite un bon poste de maître de conférence. Si l'on en parle aux *leaders* de la théorie des cordes, comme je le fais de temps en temps, on s'aperçoit qu'ils croient réellement que la concentration des efforts d'une grande communauté de chercheurs brillants mènera à un progrès plus rapide que si l'on encourage des collègues à réfléchir de façon indépendante et à poursuivre plusieurs directions.

Cette approche monolithique et « disciplinée » (comme l'a appelée un certain théoricien des cordes senior) a produit trois conséquences malheureuses. Premièrement, les problèmes qu'on ne résout pas en deux ou trois ans sont abandonnés et on n'y revient jamais. La raison en est simple : les jeunes théoriciens des cordes qui n'abandonnent pas très rapidement des spécialisations qui leur ont coûté tant d'efforts et ont le malheur de ne plus être à la mode et qui ne changent pas d'orientation pour travailler dans une nouvelle direction, se retrouvent parfois sans poste universitaire. Deuxièmement, le domaine continue d'être nourri par les idées et les programmes de recherche de quelques scientifiques maintenant assez âgés. Au cours des derniers dix ans, seulement deux jeunes théoriciens des cordes – Juan Maldacena et Raphael Bousso –, ont fait des découvertes qui changèrent la direction du développement de la théorie. Cela contraste de façon frappante avec d'autres disciplines en physique, où la majorité des idées et des directions nouvelles sont initiées par des gens âgés de vingt à quarante ans. Troisièmement, la théorie des cordes profite des talents et du travail d'un grand nombre de chercheurs, mais elle les utilise de façon inefficace. On voit beaucoup de répétition des efforts, tandis que plusieurs idées potentiellement importantes restent non explorées. Ce rétrécissement des perspectives est évident pour tous ceux qui siègent dans les comités universitaires chargés de choisir les post-docs. Dans des domaines comme la cosmologie, la théorie de l'information quantique ou la gravité quantique, on trouve autant de projets de recherche que de candidats et on découvre souvent des idées dont personne n'a jamais entendu parler auparavant. Dans le petit monde de la théorie des cordes, on a tendance à voir les mêmes deux ou trois projets de recherche défiler plusieurs fois.

Certes, les jeunes savent ce qu'ils font. J'ai de nombreuses années d'expérience dans la participation à ce genre de comités, et j'ai trouvé qu'à quelques exceptions près, les critères utilisés par les théoriciens des cordes dans l'évaluation de leurs candidats sont différents de ceux qui existent dans d'autres domaines. La capacité de faire un travail mathématiquement sensé sur des problèmes qui relèvent de l'intérêt immédiat est plus appréciée – autant que je puisse le voir – que l'invention d'idées originales. Quelqu'un qui a publié ses articles uniquement avec des scientifiques seniors, leaders du domaine, et dont tout le projet de recherche témoigne de peu de capacité de jugement indépendant ou d'originalité, ne se verra probablement pas offrir un poste dans un centre de gravité quantique, mais la même voie paraît une solution sûre pour quelqu'un qui veut obtenir un post-doc dans un centre d'étude de la théorie des cordes. Le genre de candidat qui me fascine – un jeune

chercheur qui serait l'unique auteur d'articles contenant des intuitions surprenantes ou de nouvelles hypothèses risquées – laisserait froids mes amis théoriciens des cordes.

Dans les autres communautés où j'ai passé quelque temps, comme celles de la gravité quantique et de la cosmologie, il existe une grande diversité de points de vue sur les problèmes existants. Si vous parlez à cinq experts différents, jeunes ou âgés, vous aurez cinq directions différentes dans lesquelles, selon eux, la recherche devrait être orientée. Hormis les arguments récents sur le paysage et le principe anthropique, les théoriciens des cordes ont, eux, maintenu une remarquable uniformité d'opinions. On entend la même chose, parfois exactement les mêmes mots, de la bouche de personnes différentes.

Je connais quelques jeunes théoriciens des cordes qui auront des objections à cette caractérisation. Ils affirment qu'il existe une vaste gamme d'opinions au sein de la communauté, mais qu'un étranger n'y est simplement pas initié. C'est une bonne chose de le savoir, mais ce que les gens disent en privé à leurs amis ne compte pas. En effet, si une plus large gamme d'opinions est exprimée en privé, et pas en public, cela augure d'une hiérarchie qui contrôle la conversation – et donc le programme de recherche.

Le rétrécissement délibéré des projets de recherche par les leaders de la théorie des cordes est à déplorer non seulement dans le principe, mais aussi parce que, presque sans doute, il induit un progrès plus lent. On le sait par le nombre élevé d'idées dont on a reconnu l'importance plusieurs années après qu'elles ont été énoncées. Par exemple, la découverte que la théorie des cordes relève d'une grande collection de théories a été publiée, pour la première fois, par Andrew Strominger en 1986, mais les théoriciens des cordes en ont discuté largement seulement après 2003, à la suite du travail de Renata Kallosh et de ses collègues à Stanford[5]. Voici une citation récente de Wolfgang Lerche, un théoricien des cordes réputé qui travaille au CERN :

> Comment dire... ce qui me paraît irritant est que ces idées sont là depuis le milieu des années 1980 ; dans un article sur les constructions des cordes en 4D, on a fait une estimation brute du nombre minimal de vides de la théorie des cordes, de l'ordre de 10^{1500} ; ce travail a été ignoré (parce qu'il ne correspondait pas bien à la philosophie de l'époque) par certains de ceux qui « réinventent » maintenant le paysage, et dont les noms apparaissent, dans ce contexte, dans les revues et qui semblent même écrire des bouquins sur ce sujet... [T]oute cette discussion aurait pu (et aurait dû) avoir lieu en 1986/1987. La chose la plus importante qui a changé depuis cette époque est l'état d'esprit de certaines personnes, et ce que vous voyez maintenant n'est que le résultat à 100 % de la machine propagandiste stanfordienne[6].

Ma propre proposition, qu'on traite la théorie des cordes comme le paysage des théories, a été publiée en 1992 et fut ignorée elle aussi[7]. Ce n'est pas un exemple isolé. Deux théories supersymétriques en onze dimensions ont été inventées avant la première révolution des supercordes en 1984, ignorées jusqu'à ce qu'elles soient ranimées par la deuxième révolution, plus de dix ans après. Ces théories étaient la supergravité à onze dimensions et la supermembrane à onze dimensions. Entre 1984 et 1995, un petit nombre de théoriciens ont travaillé dans ces domaines, mais la communauté les a marginalisés. Je me rappelle quelques références dérisoires faites par les théoriciens des cordes américains à ces

« fanatiques européens de la supergravité ». Après 1995, la nouvelle conjecture a été énoncée, qui unifiait ces théories avec la théorie des cordes au sein de l'ultime M-théorie ; ceux qui les avaient explorées des années durant ont à nouveau été intégrés dans la communauté. Évidemment, le progrès aurait été plus rapide si ces idées n'avaient pas été rejetées en premier lieu.

Quelques idées pourraient aider la théorie des cordes à résoudre ces problèmes centraux, mais elles n'ont pas été étudiées en profondeur. Parmi elles, la vieille idée selon laquelle un système de nombres appelés *octonions* serait la clef de la compréhension de la relation entre supersymétrie et dimensions supérieures. Également, la condition, déjà soulignée, que la formulation fondamentale de la théorie des cordes ou de la M-théorie, jusque-là non explorée, soit indépendante du fond. Au cours d'une discussion tenue lors d'une séance dédiée à la « Prochaine révolution des supercordes », au colloque des cordes de 2005, Stephen Shenker, le directeur de l'Institut de physique théorique de l'Université Stanford, a émis l'idée qu'une telle formulation viendrait probablement d'une recherche extérieure à la théorie des cordes. Si les leaders du domaine le reconnaissent, pourquoi n'encouragent-ils pas les jeunes à explorer une gamme plus large de sujets ?

Il semble que l'étroitesse du programme de recherche soit un résultat de la considération énorme dont jouit l'opinion de quelques individus dans la communauté des cordes. Les théoriciens des cordes sont les seuls scientifiques que j'ai jamais rencontrés qui souhaitent connaître ce que les seniors du domaine, comme Edward Witten, pensent d'un sujet avant de se prononcer eux-mêmes. Certes, Witten a une pensée profonde et claire, mais ce que je cherche à dire est qu'il n'est pas bon pour un domaine de recherche que trop d'autorité soit accordée à l'opinion d'une seule personne. Il n'existe pas un seul scientifique, même Newton ou Einstein, qui n'ait pas eu tort sur un nombre important de questions, au sujet desquelles ils avaient des positions affirmées. Plusieurs fois, je fus témoin de situations où, dans des discussions suivant un exposé au cours d'un colloque ou même dans une simple conversation, lorsqu'une question controversée était soulevée, quelqu'un demandait : « Bien, et Ed, qu'est-ce qu'il en pense ? » Parfois, cela me rendait fou et je le montrais en répondant : « Quand je voudrai savoir ce qu'Ed en pense, je le lui demanderai à lui. Mais si je te pose la question, à toi, c'est pour savoir ce que tu en penses, parce que c'est ton opinion qui m'intéresse. »

La géométrie non commutative est un exemple de champ de recherche ignoré par les théoriciens des cordes jusqu'à ce que Witten dise qu'il l'aimait bien. Alain Connes, son inventeur, raconte l'histoire suivante :

> Je suis allé à Chicago en 1996 et j'y ai fait un exposé au département de physique. Un physicien bien connu était présent dans la salle, mais il l'a quittée avant la fin de mon exposé. Je n'ai plus vu ce physicien avant deux ans, quand je suis allé faire le même exposé au Forum Dirac des Laboratoires Rutherford près d'Oxford. Ce physicien y a assisté, mais cette fois il avait l'air très ouvert et convaincu. Quand il a lui-même fait son propre exposé, quelque temps après, il a mentionné le mien avec des mots assez positifs. Cela m'a paru ahurissant, parce que c'était le même exposé et je n'avais pas oublié sa précédente réaction. Sur le chemin du retour vers Oxford, donc, j'étais assis dans le bus près de lui et je lui ai demandé : « Comment est-il possible que vous assistiez au même expo-

sé à Chicago et le quittiez avant la fin, et que maintenant vous dites l'aimer bien ? » Le type n'était pas du tout un débutant – il avait déjà une quarantaine d'années. Sa réponse fut : « On a vu Witten lire votre livre à la bibliothèque de Princeton[8]! »

Il faut dire que ce genre d'attitude tend à disparaître, probablement à cause du scandale qui a entouré la question du paysage. Jusqu'à l'année dernière, j'ai à peine rencontré une expression de doute chez un théoricien des cordes. Maintenant, il m'arrive d'entendre de jeunes chercheurs dire qu'il y a une « crise » en théorie des cordes. « Nous avons perdu nos leaders », se plaignent certains d'entre eux. « Avant, la bonne direction à prendre – la plus chaude – était toujours claire. Maintenant, on n'a plus de guide. » Ou encore, mais seulement entre initiés et avec un air très inquiet : « Est-ce vrai que Witten ne travaille plus sur la théorie des cordes ? »

Un autre aspect de la théorie des cordes, que beaucoup trouvent inquiétant, est ce qu'on ne peut décrire autrement que comme une tendance messianique développée par quelques-uns de ceux qui la pratiquent, particulièrement les jeunes. Pour certains d'entre eux, la théorie des cordes est devenue religion. Ceux qui, comme moi, publient des articles où les résultats et les affirmations des théoriciens des cordes sont remis en question reçoivent régulièrement du courrier électronique dont la forme la moins insultante est : « Tu rigoles ? » ou : « C'est une blague ? » On trouve en abondance des discussions d'» opposants » à la théorie des cordes sur les sites web et les blogs, où, malgré la nature effrénée de ce genre de média, l'intelligence et la compétence professionnelle des théoriciens pratiquant une autre théorie sont mises en doute en des termes particulièrement désagréables. Il est difficile de ne pas conclure qu'au moins certains théoriciens des cordes ont commencé à se considérer comme des croisés plutôt que comme des scientifiques.

Liée à toute cette fanfaronnade, j'ajouterais à mon réquisitoire la tendance à interpréter les indications que l'on possède de la façon la plus optimiste possible. Mes collègues en gravité quantique choisissent généralement un point de vue pragmatique, souvent pessimiste, sur les perspectives de solution des problèmes posés. Parmi les théoriciens de la gravité quantique à boucles, on me compte parmi les plus optimistes. Mais mon optimisme pâlit en comparaison de celui de la plupart des théoriciens des cordes. Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne les grandes questions posées. Comme je l'ai déjà dit, le point de vue « cordiste » se fonde sur des conjectures de longue date, auxquelles les « cordistes » croient, mais qui n'ont jamais été prouvées. Certains théoriciens des cordes y adhèrent quelle que soit la vérité. L'optimisme est une bonne chose quand il est mesuré ; certainement pas quand il mène à des mésinterprétations évidentes. Malheureusement, l'image généralement présentée au grand public, dans les livres, les articles et à la télévision – autant que celle présentée au public scientifique – diverge considérablement de ce qui est suggéré par la lecture directe des résultats publiés. Par exemple, dans une revue réputée et bien connue des physiciens, une critique du livre *Le Paysage cosmique* de Leonard Susskind (publié en 2005) en vient à parler de l'existence de plusieurs théories des cordes en ces termes :

> Ce problème est résolu par la M-théorie, qui est une théorie unique, qui contient tout et qui englobe les cinq théories des supercordes en introduisant onze dimensions spatio-temporelles, tout en comprenant en même temps des objets étendus de dimensions supérieures appelés branes. Parmi les résultats de la M-théorie, on compte la première explication microscopique de l'entropie des trous noirs, prédite initialement par Hawking à l'aide des arguments macroscopiques... Le problème avec la M-théorie est que, bien que ses équations puissent être uniques, elle a des milliards et des milliards de solutions différentes[9].

L'exagération la plus évidente de ce texte est qu'il insinue que la M-théorie existe en tant que théorie précise, et non pas en tant que conjecture, et qu'elle a des équations bien définies, deux choses fausses. La prétendue explication de l'entropie des trous noirs (comme j'ai dit au chapitre 9) est aussi une exagération, parce que les résultats de la théorie des cordes fonctionnent seulement pour des trous noirs spéciaux et atypiques.

On peut aussi trouver ce genre de distorsions dans les pages web qui essayent d'introduire le grand public à la théorie des cordes, comme par exemple celle-ci :

> Il existe même un mode qui décrit le graviton, c'est-à-dire la particule qui porte la force de gravitation, et c'est une des raisons importantes pour laquelle la théorie des cordes a reçu tant d'attention. L'idée est qu'on peut rendre sensible, en théorie des cordes, l'interaction entre deux photons d'une façon qui serait impossible en théorie quantique des champs. Il n'y a pas d'infinis ! Et la gravité n'est pas une chose introduite à la main. Elle doit être là dans une théorie des cordes. Le premier grand résultat de la théorie des cordes est donc qu'elle fournit une théorie cohérente de la gravité quantique[10].

Ceux qui sont responsables de cette page web savent bien que personne n'a jamais prouvé qu'il « n'y a pas d'infinis ». Mais il semble qu'ils sont assez confiants concernant la réalité de la conjecture pour oser la présenter comme un fait établi. Plus loin, les mêmes auteurs soulèvent le problème des cinq différentes théories des supercordes :

> Et c'est seulement à ce moment-là qu'on a compris que les cinq théories des supercordes sont en réalité des îlots sur la même planète, pas sur des planètes différentes ! Ainsi, il existe une théorie sous-jacente dont toutes les théories des cordes ne sont que des aspects différents. Celle-ci s'appelle M-théorie. Le « M » pourrait signifier *M*ère de toutes les théories, ou *M*ystère, parce que la planète que nous appelons M-théorie est encore largement inexplorée.

Ce texte affirme clairement qu'» il existe une théorie sous-jacente », même si, dans la dernière phrase, on admet que la M-théorie est encore « largement inexplorée ». Une personne extérieure pourrait en conclure qu'il existe une théorie, appelée M-théorie, qui possèdent tous les attributs habituels d'une théorie véritable, comme la formulation de principes précis et une représentation par des équations précises[11].

Plusieurs articles et exposés généraux contiennent aussi des affirmations vagues et imprécises à propos des résultats de la théorie des cordes. Malheureusement, il existe une grande confusion au sujet de ce que la théorie des cordes a réellement réussi ; et il y a aussi une tendance à exagérer ces résultats et à diminuer le poids des difficultés. Quand j'en ai parlé avec des experts, j'ai été choqué par le nombre de théoriciens des cordes incapables

de fournir des réponses correctes et détaillées aux questions sur le statut des conjectures centrales, comme la finitude de la théorie des perturbations, la S-dualité, la conjecture de Maldacena ou la M-théorie.

Je réalise que ce que je viens d'affirmer est une accusation forte et que je dois l'illustrer par un exemple. Une des déclarations répandues et souvent entendues au sujet de la théorie des cordes est que celle-ci est finitaire. Cela signifie que les réponses qu'elle fournit à toutes les questions physiques qu'on peut poser ne font intervenir que des nombres finis. Il paraît évident que toute théorie viable doit fournir des réponses finies aux questions concernant des probabilités, ou des prédictions finies concernant la masse et l'énergie d'une particule, ou concernant la puissance d'une force. Pourtant, les théories des forces fondamentales existantes échouent souvent sur ce point. En effet, parmi le grand nombre de théories des forces différentes, cohérentes avec les principes de relativité, toutes, sauf quelques-unes, mènent à des réponses infinies à ces questions. C'est particulièrement valable dans le cas des théories quantiques de la gravitation. Plusieurs approches qu'on avait crues prometteuses furent abandonnées parce qu'elles ne menaient pas à des réponses finies. Les quelques exceptions comprennent la théorie des cordes et la gravité quantique à boucles.

Comme je l'ai déjà dit au chapitre 12, l'affirmation selon laquelle la théorie des cordes donne des réponses finies est fondée sur un schéma d'approximation, appelé théorie des perturbations. Cette technique fournit un ensemble infini d'approximations aux mouvements et aux interactions des cordes, tout ceci dans un cadre fixé à l'avance. On parle de la première approximation, du second ordre d'approximation, puis du dix-septième, du cent millionième et ainsi de suite jusqu'à l'infini. Pour prouver qu'une théorie est finitaire en utilisant ce schéma, on doit prouver que chaque terme parmi ce nombre infini de termes est fini. C'est une tâche difficile, mais pas impossible. Par exemple, on l'a réalisée pour la théorie quantique d'électromagnétisme, ou EDQ, à la fin des années 1940 et au début des années 1950. C'est une réussite de Richard Feynman, Freeman Dyson et d'autres théoriciens de leur génération. Le modèle standard de la physique des particules a été démontré finitaire en 1971 par Gerard 't Hooft.

La fascination de 1984-1985 était due, en partie, à la démonstration de la finitude des cinq théories initiales des supercordes dans la première approximation. Quelques années plus tard, un article a été publié par un théoricien réputé du nom de Stanley Mandelstam, considéré alors comme la preuve de la finitude de toute l'infinité des termes dans l'approximation[12].

À l'époque, la réponse à l'article de Mandelstam n'était pas univoque. En effet, il existe un argument intuitif – auquel croient beaucoup de théoriciens des cordes –, qui suggère fortement que si la théorie existe tout court, alors elle fournira des réponses finies. En même temps, quelques mathématiciens que je connais, tous experts dans les détails techniques de la démonstration, ont nié que l'argument de Mandelstam fût une preuve aboutie.

Depuis des années, je n'entends plus beaucoup parler de la question de la finitude. Elle s'est dissoute lorsque l'attention des chercheurs s'est portée sur d'autres sujets. De temps

en temps, un article surgissait sur Internet qui traitait de ce problème ; mais je n'y prêtais guère attention. En effet, je ne me rappelle pas avoir eu de doutes au sujet de la finitude de la théorie, et ceci jusqu'à un moment récent. La plupart des développements que j'ai suivis depuis vingt ans, ainsi qu'une bonne partie de mon propre travail dans ce domaine, se fondaient sur le présupposé que la théorie des cordes était finitaire. Pendant toutes ces années, j'ai écouté beaucoup d'exposés faits par des théoriciens des cordes qui commençaient inévitablement par dire que la théorie fournissait une « théorie finitaire de la gravitation », avant que le conférencier n'en vienne au cœur de son sujet. De nombreux livres furent écrits et de nombreuses conférences publiques prononcées, qui affirmaient que la théorie des cordes était la bonne théorie quantique de la gravitation et présupposaient, explicitement ou implicitement, que la théorie des cordes était finitaire. En ce qui concerne mon propre travail, je croyais qu'on avait démontré que la théorie des cordes était finitaire (ou presque démontré, sauf pour un détail technique qu'il restait à élucider et dont seulement les mathématiciens devaient s'inquiéter) ; c'était la raison majeure de mon intérêt continu envers la théorie des cordes.

En 2002, on m'a demandé d'écrire et de présenter un panorama de tout le domaine de la gravité quantique dans un colloque organisé en l'honneur de John Wheeler, un de ses fondateurs. J'ai décidé que la meilleure façon de brosser un tel panorama serait de faire une liste de tous les résultats importants mis au jour par les approches différentes. J'avais espéré que cela offrirait une comparaison objective des performances de chacune des approches sur le chemin du but ultime, une théorie de la gravité quantique. J'ai écrit un brouillon de ma liste, et, naturellement, un des résultats sur cette liste était la finitude de la théorie des supercordes.

Pour achever mon texte panoramique, j'ai évidemment dû trouver les citations exactes et les références aux articles où était démontré chacun des résultats que je mentionnais. Pour la plupart d'entre eux, cela n'a présenté aucune difficulté, mais j'ai rencontré un problème lorsque j'ai commencé à chercher la bonne référence pour la preuve de la finitude de la théorie des cordes. En étudiant les sources diverses, je n'y voyais que la référence à l'article initial de Mandelstam – celui qui est incomplet selon les mathématiciens. J'ai trouvé aussi quelques autres articles sur le même sujet, dont aucun ne déclarait avoir obtenu le résultat escompté. Ensuite, j'ai commencé à poser la question aux théoriciens des cordes que je connaissais, en personne et par courrier électronique, leur demandant quel était le statut de la finitude et s'ils avaient la référence du papier qui en contenait la preuve. J'ai posé cette question à une bonne dizaine de personnes, jeunes et plus âgées. Pratiquement tous ceux qui m'ont répondu ont affirmé que le résultat était vrai. La plupart n'avaient pas la référence de la preuve, et ceux qui l'avaient m'ont dirigé vers l'article de Mandelstam. Frustré, j'ai cherché dans les articles panoramiques qui font le tour de la question : on écrit ce genre de papier pour donner une vue d'ensemble de la recherche en cours et des résultats majeurs. Parmi plus de quinze articles panoramiques que j'ai consultés, la majorité disait explicitement ou impliquait que la théorie était finitaire[13]. Comme références, je n'ai trouvé que les articles panoramiques antérieurs et le papier de Mandelstam. Mais j'ai trouvé aussi un article écrit par un physicien russe, qui expliquait que le

résultat n'avait pas été démontré[14]. Il était difficile de croire qu'il pouvait avoir raison et que tous les articles écrits par des scientifiques beaucoup plus éminents, que je connaissais parfois personnellement et pour qui j'avais la plus grande admiration, avaient tort.

Finalement, j'ai posé la question à mon collègue de Perimeter, Robert Myers. Il m'a répondu avec sa franchise toujours rafraîchissante qu'il ne savait pas si la finitude avait été complètement démontrée, mais il m'a suggéré de contacter quelqu'un qui pourrait le savoir, du nom d'Eric D'Hoker. Je suis allé voir cette personne, et c'est de cette façon que j'ai finalement découvert que D'Hoker et Phong avaient réussi, en 2001, à démontrer que la théorie est finie au second ordre d'approximation (voir chapitre 12). Jusqu'à cet instant, depuis 1984, pendant dix-sept ans, aucun progrès sérieux n'avait été accompli. (Comme je l'ai écrit au chapitre 12, il y a eu plus d'avancées pendant les quatre années qui ont suivi l'article de D'Hoker et Phong, essentiellement dû à Nathan Berkovits. Mais sa preuve repose sur des présupposés supplémentaires, également non démontrés, et bien qu'elle soit un pas en avant, elle n'est pas encore la preuve complète de la finitude.) Ainsi, dans les faits, on savait qu'ils étaient finis seulement pour les trois premiers d'une infinité de termes dans l'approximation. Au-delà de ces trois, on ne savait et on ne sait toujours pas si la théorie est finitaire ou non.

Quand j'ai décrit cette situation dans ma présentation destinée au colloque en l'honneur de Wheeler, elle a été accueillie avec scepticisme. J'ai reçu quelques messages, pas tous gentils, qui disaient que j'avais tort, que la théorie était finie et que Mandelstam l'avait prouvé. J'ai aussi vécu une expérience identique lorsque j'en ai discuté avec des théoriciens des cordes : la plupart d'entre eux étaient choqués quand on leur disait que la preuve de la finitude n'avait jamais été menée jusqu'au bout. Mais leur réaction n'était rien comparée à celle des physiciens et des mathématiciens avec qui j'avais parlé, qui ne travaillaient pas sur la théorie des cordes mais qui croyaient celle-ci finitaire parce que les théoriciens des cordes l'affirmaient. Pour nous tous, l'impression que la théorie des cordes était une théorie finitaire avait beaucoup à voir avec notre reconnaissance de son importance. Personne ne se rappelait avoir entendu un seul théoricien des cordes présenter ce problème comme une question ouverte.

J'ai profondément ressenti la bizarrerie de la situation. Je devais présenter un article qui devait évaluer dans le détail des indications qui soutiennent les différentes conjectures en théorie des cordes. Sans doute, ai-je pensé, est-ce une chose qu'un des leaders du domaine doit faire périodiquement ? Ce genre de critique panoramique, soulignant les problèmes centraux non résolus, est une chose commune en gravité quantique, en cosmologie et, je crois, dans la plupart des autres disciplines scientifiques. Puisque cela n'a pas été fait par un des leaders de la théorie des cordes, on l'a donné à faire à quelqu'un comme moi, un « quasi-initié » qui possédait la maîtrise technique mais pas l'engagement sociologique. J'ai accepté de le faire en raison de mon intérêt pour la théorie des cordes, à laquelle, à l'époque, je consacrais presque tout mon temps. Néanmoins, certains théoriciens des cordes ont pris ma présentation pour un acte hostile.

Mon bon ami Carlo Rovelli du Centre de physique théorique à Marseille travaille sur la gravité quantique. Il a vécu la même expérience lorsqu'il a introduit, dans un dialogue

imaginaire écrit pour dramatiser le débat entre les différentes approches de la gravité quantique, un passage disant qu'on n'avait jamais prouvé que la théorie des cordes était finitaire. Il reçut tant de messages qui affirmaient que Mandelstam avait démontré la finitude de la théorie qu'il a décidé d'écrire à Mandelstam et de lui demander directement son avis. Mandelstam est maintenant à la retraite, mais il lui répondit rapidement. Il expliqua que tout ce qu'il avait prouvé était qu'une espèce particulière de terme infini n'apparaît nulle part dans la théorie. Mais il dit également qu'il n'avait pas, en fait, prouvé que la théorie elle-même était finie, car d'autres types de termes infinis pourraient surgir[15]. On n'a pas vu de terme de ce genre dans les calculs réalisés jusqu'à ce jour, mais personne n'a, non plus, démontré qu'un tel terme ne pouvait jamais apparaître.

Aucun des théoriciens des cordes avec qui j'ai discuté de ce problème, au moment où je lui ai appris que la démonstration finitaire de la théorie des cordes n'existait pas, n'a pris la décision d'arrêter son travail en théorie des cordes. J'ai également rencontré d'éminents théoriciens des cordes qui disaient avoir prouvé la finitude de la théorie des dizaines d'années auparavant, mais qu'ils n'avaient pas publié la preuve en raison d'une petite question technique qui restait à résoudre.

Mais quand la question de la finitude sera résolue (si elle l'est un jour), nous devrons nous demander comment il est possible que tant de chercheurs n'aient pas été au courant du vrai statut d'un des résultats centraux de leur domaine de recherche. Ne doit-on pas s'inquiéter du fait qu'entre 1984 et 2001, beaucoup de théoriciens des cordes aient parlé et écrit comme si la finitude de la théorie était un fait établi ? Pourquoi beaucoup de théoriciens des cordes parlaient-ils avec une telle aisance aux étrangers de leur domaine et aux nouveaux initiés, en utilisant un langage impliquant nécessairement que la théorie était parfaitement finitaire et cohérente ?

La finitude n'est pas le seul exemple en théorie des cordes d'une conjecture à laquelle tout le monde croit sans qu'elle soit démontrée. J'ai déjà dit que dans la littérature existent quelques versions de la conjecture de Maldacena qui produisent des conséquences très différentes. On est sûr que la plus forte de ces conjectures n'a pas été prouvée, loin de là, quoiqu'une version plus faible soit sans doute assez bien soutenue. Mais ce n'est pas ainsi que le voient la plupart des théoriciens des cordes. Dans une étude récente sur la conjecture de Maldacena, Gary Horowitz et Joseph Polchinski la comparent à une conjecture connue également non résolue en mathématiques, l'hypothèse de Riemann :

> En résumé, nous voyons des raisons convaincantes de mettre [la conjecture de Maldacena sur la dualité] dans la catégorie du *vrai, mais non démontré*. En effet, nous la traitons au même niveau que les conjectures mathématiques comme l'hypothèse de Riemann. Les deux manifestent des liens inattendus entre deux structures qui au premier regard paraissent bien différentes... et chacune a résisté à la preuve et aux contre-exemples bien qu'on leur ait prêté une grande attention[16].

Je n'ai jamais entendu un mathématicien se référer à un résultat comme « vrai mais non démontré ». Par-dessus tout, ce qui est ici stupéfiant est que les auteurs, deux personnes fort intelligentes, ignorent une différence évidente entre les deux cas dont ils parlent. On

sait que les structures reliées par l'hypothèse de Riemann existent toutes les deux sur un plan mathématique rigoureux ; ce qui est en question n'est que la relation conjecturée entre elles. Mais on ne sait ni si la théorie des cordes, ni si les théories supersymétriques de jauge existent réellement en tant que structures mathématiques ; en effet, *leur existence même fait partie du problème*. Ce que cette citation affirme clairement, c'est que les auteurs raisonnent comme si la théorie des cordes était une structure mathématique bien définie – malgré le large consensus proclamant que, même si c'était le cas, on n'aurait aucune idée de ce que serait cette structure. Si on ne fait pas ce présupposé non démontré, alors l'évaluation qu'on fera des indications soutenant la version la plus forte de la conjecture de Maldacena ne pourra que diverger d'avec la leur.

Concernant la défense de leur croyance quant aux conjectures non démontrées, les théoriciens des cordes notent souvent que quelque chose est de « croyance générale » dans la communauté de la théorie des cordes ou qu'» aucune personne raisonnable ne doutera de sa vérité ». Ils ont l'air de croire que l'appel au consensus à l'intérieur de leur communauté équivaut à un argument rationnel. Voici un exemple typique, pris sur le blog d'un théoricien des cordes bien connu :

> *Tous ceux qui ne dormaient pas au cours des six dernières années savent* que la gravité quantique dans l'espace asymptotiquement anti-de Sitter a l'évolution temporelle unitaire... Avec la grande accumulation des indications pour AdS/CFT, *je ne suis pas sûr qu'il reste beaucoup de vieux réfractaires* qui ont des doutes quant à la vérité de ce fait – et pas seulement dans la limite semi-classique que considère Hawking, mais en pleine théorie non perturbative[17]. [C'est moi qui souligne.]

Je déteste devoir admettre que je fais partie des vieux réfractaires. L'examen détaillé des faits m'y force néanmoins.

Cette attitude cavalière par rapport aux preuves précises des conjectures centrales est contre-productive pour plusieurs raisons. Premièrement, en combinaison avec les tendances décrites plus haut, cela signifie que quasiment personne ne travaille sur ces problèmes importants, tout en rendant encore plus probable qu'ils restent posés pour longtemps. Cela mène aussi à une corrosion de l'éthique et des méthodes scientifiques, car une communauté importante de personnes intelligentes se montre prête à croire à des conjectures essentielles sans demander qu'on leur en donne les preuves.

De plus, quand des résultats importants sont découverts, leur portée est souvent exagérée. Quelques théoriciens qui ne travaillent pas en théorie des cordes m'ont demandé pourquoi je continuais à faire des recherches dans d'autres domaines alors que la théorie des cordes avait déjà complètement expliqué l'entropie des trous noirs. Quoique j'admire profondément le travail sur les trous noirs extrémaux, celui de Strominger, Vafa et autres (voir chapitre 9), je dois réaffirmer que les résultats précis n'ont pas été généralisés pour tous les trous noirs, et semble-t-il pour de bonnes raisons.

De la même façon, l'affirmation qu'un grand nombre de théories des cordes ayant une constante cosmologique positive existent (le « paysage » auquel on se réfère tant), est loin d'être sûre. Et pourtant, quelques-uns parmi les meilleurs théoriciens sont désireux, se

fondant seulement sur ces faibles résultats, de faire des grandes déclarations à propos du succès de la théorie des cordes et de ses perspectives pour l'avenir.

Il est bien possible que cette exagération persistante ait porté ses fruits pour la théorie des cordes contre ses rivaux. Si vous êtes directeur d'un département de recherche ou administrateur d'une agence qui distribue les fonds, n'est-il pas plus tentant de financer ou de recruter un scientifique qui travaille sur le projet dont on dit qu'il résout les grands problèmes de la physique, plutôt qu'un autre scientifique qui dit simplement qu'il ou elle a trouvé des indications qu'il puisse exister une théorie – encore non formulée –, qui aura le potentiel de résoudre ces problèmes ?

Je vais brièvement résumer tout ce que je viens de dire. La discussion a mis au jour sept aspects inquiétants de la communauté de la théorie des cordes :

1. Une *énorme confiance en soi* qui donne le sentiment d'être élu et d'appartenir à une communauté d'élite.
2. Une *communauté inhabituellement monolithique* qui manifeste un sens fort du consensus, que celui-ci s'appuie sur des preuves ou non, et une uniformité inhabituelle des opinions sur les questions posées. Ces opinions semblent être liées à l'existence d'une structure hiérarchique où les idées de quelques leaders dictent le point de vue général, la stratégie et la direction que doit prendre le développement du champ de recherche.
3. Dans certains cas, une *sensation d'appartenance au groupe* semblable à l'identification à une foi religieuse ou un parti politique.
4. Un sentiment fort de la *frontière entre le groupe des initiés et les autres experts*.
5. *Un mépris et une absence d'intérêt* pour les idées, les opinions et le travail des scientifiques qui ne font pas partie du groupe, et une posture qui ne permet de discuter qu'avec les autres membres de la même communauté.
6. Une tendance à *interpréter les indications de façon optimiste*, de croire aux interprétations exagérées des résultats, et de négliger la possibilité que la théorie puisse se révéler fausse. Ceci vient de pair avec une tendance à *croire que les résultats sont vrais parce que « tout le monde y croit »*, même si l'on n'a pas vérifié (ni même vu) la preuve respective.
7. Un manque d'appréciation de la mesure du risque que le programme de recherche doit faire intervenir.

Bien évidemment, tous les théoriciens des cordes ne peuvent pas être caractérisés de cette façon, mais peu d'observateurs, à l'intérieur comme à l'extérieur de la communauté de la théorie des cordes, pourraient nier que certaines ou toutes ces attitudes caractérisent ladite communauté.

Je veux souligner avec force que je ne critique pas le comportement d'individus particuliers. Beaucoup de théoriciens des cordes sont, personnellement, des personnes à l'esprit ouvert, pour qui l'autocritique n'est pas étrangère ; et si on leur pose la question, ils diront qu'ils déplorent ces caractéristiques de leur propre communauté.

Je dois également être clair sur le fait que je partage entièrement la faute avec mes collègues en théorie des cordes. Pendant des années, je croyais que ses conjectures principales, telle la finitude, étaient démontrées. En grande partie, c'est la raison pour laquelle j'ai in-

vesti, en théorie des cordes, des années de ma propre recherche. Mais la situation est telle que bien plus que mon travail s'en est trouvé affecté, car parmi la communauté des gens qui travaillaient sur la gravité quantique, j'étais celui qui argumentait avec le plus de force pour que la théorie des cordes soit prise au sérieux. Et pourtant, je n'ai pas passé assez de temps à vérifier la littérature et, par conséquent, je faisais partie, moi aussi, de ceux qui laissèrent les leaders de la théorie des cordes mener le travail de réflexion critique à leur place. Pendant les années où j'ai travaillé sur la théorie des cordes, j'accordais un grand poids au jugement des leaders de la communauté sur mon travail. Comme un adolescent, je voulais être accepté et reconnu par les plus forts et les plus puissants de mon petit cercle. Et, si au bout du compte, je n'ai pas suivi leur conseil et n'ai pas dédié toute ma vie à élaborer leur théorie, c'est uniquement parce que chez moi l'obstination prend habituellement le dessus dans ce genre de situation. Pour moi, ce n'était pas une question de « nous » contre « eux », ni une bataille entre deux communautés pour une place prédominante en physique. Ce sont des problèmes très personnels auxquels je fais face depuis que je suis scientifique.

J'ai beaucoup de sympathie pour les théoriciens des cordes qui souhaitent à la fois être de bons scientifiques et obtenir une approbation de la part des leaders de leur domaine. Je comprends la difficulté à réfléchir clairement et indépendamment quand la reconnaissance par la communauté demande une foi aveugle en un ensemble d'idées complexes dont vous ne connaissez vous-même pas les preuves. C'est un piège tel qu'il m'a fallu des années pour m'en échapper.

Tout ceci renforce ma conviction qu'il faut s'inquiéter de nous, physiciens théoriciens. Si vous demandez aux théoriciens des cordes pourquoi les scientifiques qui travaillent sur les alternatives à la théorie des cordes ne sont jamais invités aux colloques sur les cordes, ils vous répondront que, comme vous, ils jugent important d'inviter ces chercheurs et ils se plaindront de l'état actuel des affaires, mais ils insisteront en même temps sur le fait qu'ils n'y peuvent rien. Si vous demandez pourquoi, dans les groupes de recherche en théorie des cordes, on ne recrute jamais comme post-docs ou comme maîtres de conférences des jeunes qui travaillent sur les alternatives aux cordes, et pourquoi on ne les convie qu'en tant que visiteurs, ils seront d'accord avec vous pour dire que ce serait une bonne chose et ils se lamenteront aussi que cela ne soit pas le cas. Beaucoup d'entre nous reconnaissent que cette situation pose de grands problèmes, mais personne ne se sent responsable.

J'ai une grande confiance en mes amis théoriciens des cordes. Je crois qu'en tant qu'individus, ils ont presque tous un esprit ouvert, qu'ils savent s'autocritiquer et qu'ils sont individuellement moins dogmatiques qu'en groupe.

Comment donc une communauté peut-elle agir d'une façon si contraire à la bonne volonté et aux bonnes intentions de ses membres ?

Il s'avère que les sociologues n'ont aucune difficulté à reconnaître ce phénomène. Celui-ci afflige les communautés d'experts de haut niveau, qui, par la force des choses ou consciemment, ne communiquent qu'entre eux. Il fut étudié dans le contexte des agences de renseignement, des agences gouvernementales et des grandes sociétés. Comme les consé-

quences en furent parfois tragiques, il existe une importante littérature sur ce phénomène appelé « pensée de groupe ».

Un psychologue de Yale, Irving Janis, qui a inventé ce terme dans les années 1970, définit la pensée de groupe comme « un mode de pensée auxquels les gens s'engagent quand ils sont profondément compris dans un groupement cohésif, où les aspirations des membres à l'unanimité l'emportent sur leur motivation d'évaluer de façon réaliste et raisonnable les différentes directions alternatives du développement[18] ». Selon cette définition, la pensée de groupe surgit seulement quand le degré de cohésion est élevé. Elle exige que les membres partagent un fort sentiment de solidarité « entre eux » et un désir de maintenir les relations à l'intérieur du groupe quel qu'en soit le coût. Quand des collègues fonctionnent dans le mode de pensée de groupe, ils appliquent automatiquement le principe de « préservation de l'harmonie du groupe » à toute décision qu'ils prennent[19].

Janis étudiait les échecs de la prise de décision par les groupes d'experts comme les exilés cubains de la Baie des Cochons. Ce terme fut ensuite appliqué à beaucoup d'autres exemples, y compris la responsabilité de la NASA dans le désastre de *Challenger*, l'échec de l'Occident de ne pas avoir prévu la désintégration de l'Union Soviétique, l'échec des compagnies automobiles américaines de ne pas avoir prévu la demande pour des voitures plus petites et, plus récemment – et peut-être de façon plus scandaleuse – la hâte de l'administration Bush d'entrer en guerre sur la fausse croyance que l'Irak possédait des armes de destruction massive.

Voici une description de la pensée de groupe, extraite du site web de l'université d'État d'Oregon, qui concerne la communication :

Les membres de la communauté qui manifestent la pensée de groupe se voient eux-mêmes comme faisant partie d'un clan fermé, qui est en lutte contre l'extérieur du clan, celui-ci étant opposé à leurs fins. On peut dire qu'un groupe manifeste la pensée de groupe si :

1. Il surestime son invulnérabilité ou sa haute posture morale.
2. Il rationalise collectivement les décisions qu'il fait.
3. Il diabolise ou caricature ceux qui sont hors du groupe et leurs leaders.
4. Il a une culture d'uniformité, où les individus s'autocensurent et censurent les autres pour maintenir la façade unanime du groupe.
5. Il comprend des membres qui prennent sur eux la décision de protéger le leader du groupe en gardant l'information hors de sa portée, que ce rôle leur appartienne ou pas[20].

Cela ne correspond pas de façon parfaite à ma caractérisation de la culture de la théorie des cordes, mais c'est néanmoins assez proche de celle-ci pour qu'on s'en inquiète.

Certes, les théoriciens des cordes n'auront aucune difficulté pour répondre à cette critique. Ils pourraient pointer de nombreux exemples historiques qui montrent que le progrès scientifique dépend de l'établissement d'un consensus à l'intérieur d'une communauté d'experts. Les opinions de ceux qui sont hors du cercle peuvent être négligées, car ces personnes n'ont pas la qualification nécessaire pour pouvoir manipuler les instruments qu'utilise le groupe afin d'évaluer les preuves et prononcer un jugement. On en déduit

que la communauté scientifique doit posséder des mécanismes pour établir et appliquer le consensus. Donc, ce qu'une personne extérieure peut interpréter comme une pensée de groupe n'est en fait que la rationalité pratiquée sous la contrainte de règles très strictes.

Les théoriciens des cordes peuvent aussi riposter qu'ils permettent au consensus à l'intérieur de leur communauté de remplacer la réflexion critique individuelle. D'après un éminent sociologue des sciences, avec qui j'ai discuté de cette question, le fait qu'on croie aux conjectures fondamentales sans que celles-ci soient démontrées n'est pas inhabituel[21]. Tout scientifique ne peut confirmer directement qu'une petite fraction des résultats expérimentaux, des calculs et des preuves, qui constituent le fondement de leurs croyances professionnelles ; peu d'entre eux en ont les capacités et, en science contemporaine, personne n'en a le temps. Ainsi, quand vous rejoignez une communauté scientifique, vous êtes obligé de croire vos collègues et de leur faire confiance pour qu'ils vous disent ce qui a été réussi de véritablement profond dans leurs propres champs d'expertise. Cela peut conduire à ce qu'une conjecture soit acceptée comme fait établi, mais ce sera le cas aussi bien dans les programmes de recherche qui réussissent que dans ceux qui échouent. On ne peut pas faire de la science contemporaine sans avoir confiance en ce que disent les membres de la communauté scientifique. Par conséquent, bien qu'il faille regretter chaque épisode de ce genre et les corriger dès qu'on les découvre, ils ne prouvent pas à eux seuls que le programme de recherche est condamné à mort ou que sa sociologie est pathologique.

Finalement, les théoriciens des cordes seniors peuvent aussi dire qu'ils méritent leurs titres et qu'avec les titres vient le droit de diriger la recherche comme ils l'entendent. Après tout, la pratique scientifique repose sur des intuitions, et c'est-là la leur. Quelqu'un voudrait-il leur demander de gaspiller leur temps à travailler dans un domaine auquel ils ne croient pas ? Doivent-ils recruter des scientifiques qui travaillent sur les théories autres que celles qui, comme ils le croient, ont les meilleures chances de réussir ?

Comment répondre à cette justification ? Si la science repose sur un consensus entre la communauté d'experts, ce qu'on trouve en théorie des cordes est une communauté d'experts qui sont en accord remarquable quant à la vérité ultime de la théorie qu'ils étudient. Y a-t-il un terrain rationnel où se tenir si on voulait mener une opération de dissidence intelligente et utile ? Nous devons faire beaucoup plus que de lancer des termes comme « pensée de groupe ». Nous devons avoir une théorie de ce qu'est la science et comment elle fonctionne, qui démontrerait clairement pourquoi il n'est pas bon pour la science qu'une communauté particulière commence à dominer un domaine avant que sa théorie n'ait passé les tests habituels de validité. C'est la tâche que j'entreprends dans le chapitre suivant.

17
Qu'est-ce que la science ?

Pour inverser ces tendances inquiétantes en physique, il faut d'abord comprendre ce qu'est la science : qu'est-ce qui la fait avancer ? qu'est-ce qui l'en empêche ? Pour répondre, il convient de définir la science comme quelque chose de plus grand que la somme du travail des scientifiques. Le but de ce chapitre est de proposer une telle définition.

Quand j'ai commencé ma thèse à Harvard en 1976, j'étais un étudiant naïf arrivant d'une petite université provinciale. J'étais subjugué par mes héros : Einstein, Bohr, Heisenberg et Schrödinger, et par la façon dont ils avaient changé la physique grâce à la force de leur pensée radicale. Je rêvais, comme le font les jeunes, de faire moi-même partie de ce groupe. À Harvard, je me suis retrouvé dans le centre même de la physique des particules, entouré par les leaders de ce domaine : Sidney Coleman, Sheldon Glashow et Steven Weinberg. Ces gens étaient incroyablement intelligents, mais ils ne ressemblaient pas à mes héros. Pendant les cours, je ne les ai jamais entendus parler de la nature de l'espace et du temps ou des problèmes des fondements de la mécanique quantique. Je n'ai pas, non plus, rencontré beaucoup d'étudiants qui partageaient ces intérêts.

Ce fut pour moi la cause d'une crise personnelle. J'étais sans doute moins bien préparé que les étudiants venant des grandes universités, mais j'avais fait de la recherche pendant mes premières années, tandis que la plupart de mes copains ne l'avaient pas fait, et je savais aussi que je pouvais apprendre vite. J'estimais donc pouvoir entreprendre tout ce qui était nécessaire. Mais j'avais aussi une idée très précise de ce que devait être un grand physicien théoricien. Or les grands physiciens théoriciens que je côtoyais à Harvard en étaient très éloignés. L'atmosphère n'était pas philosophique, mais sévère et agressive, dominée par les gens qui étaient effrontés, confiants, suffisants, et qui parfois même insultaient ceux qui n'étaient pas d'accord avec eux.

À cette époque, je suis devenu ami avec une jeune philosophe des sciences du nom d'Amelia Rechel-Cohn. Grâce à elle, j'ai rencontré des gens qui, comme moi, étaient intéressés par les problèmes philosophiques et fondamentaux de la physique. Mais cela a seulement rendu les choses pires encore. Ces gens étaient plus sympas que les physiciens théoriciens, mais ils semblaient se contenter d'analyser uniquement les questions logiques se rattachant aux fondements de la relativité restreinte ou de la mécanique quantique ordi-

naire. Je n'avais pas beaucoup de patience pour ce genre de discussion ; je voulais *inventer* des théories, pas les critiquer, et j'étais persuadé que même si les inventeurs du modèle standard semblaient être dénués de toute réflexion philosophique, ils savaient des choses que je devais savoir aussi si je voulais avancer.

Juste quand je commençais à penser sérieusement à l'idée d'abandonner, Amelia m'a donné un livre du philosophe Paul Feyerabend. Il était intitulé *Contre la méthode* et écrit dans un langage qui me parlait – mais qui n'était pas très encourageant. C'était un coup dur porté à ma naïveté et mon auto-intégration.

Ce que le livre de Feyerabend avait à me dire était ceci : *Dis donc, gamin, arrête de rêver ! La science, ce n'est pas quand les philosophes siègent dans le ciel. C'est une activité humaine, aussi complexe et problématique que toute autre. Il n'existe pas de méthode unique en science, ni de critère unique pour dire qui est le bon scientifique. La bonne science est tout ce qui marche à un instant donné de l'histoire pour faire avancer nos connaissances. Et ne m'embête pas avec ton idée de définir ce qu'est le progrès – définis-le comme tu veux, et ce sera toujours vrai.*

De Feyerabend j'ai appris que le progrès est quelque chose qui nécessite, parfois, une réflexion philosophique profonde mais qui, dans la plupart des cas, n'en a aucun besoin. En grande partie, il est fait par des gens opportunistes qui coupent court et brûlent les étapes, en exagérant l'importance de ce qu'ils savent et des résultats qu'ils obtiennent. Galilée en faisait partie ; beaucoup de ses arguments étaient faux, et ses opposants – les astronomes jésuites de l'époque, bien formés, sachant réfléchir philosophiquement – mettaient à mal son raisonnement autant qu'ils le voulaient. Néanmoins, c'était lui qui avait raison, et eux, tort.

Une autre chose apprise de Feyerabend est qu'un aucun argument *a priori* ne peut déterminer ce qui marchera, ou pas, dans chaque circonstance. Ce qui marche pour faire avancer la science à un moment donné sera inutile à un autre. Et j'ai appris encore quelque chose de ces histoires galiléennes : il faut se battre pour ce en quoi l'on croit.

Le message de Feyerabend a été la sonnerie du réveil qui s'est déclenchée juste au bon moment. Si je voulais faire de la bonne science, alors je devais reconnaître que les gens avec qui j'avais eu la chance de faire mes études étaient réellement les grands scientifiques du moment. Comme tous grands scientifiques, ils réussirent parce que leurs idées étaient bonnes et qu'ils se sont battus pour elles. Si vos idées sont bonnes et que vous vous battez, vous accomplirez quelque chose. Ne gaspillez pas votre temps à vous désoler ou à alimenter votre nostalgie pour Einstein et Bohr. Personne ne développera vos idées pour vous, et personne ne se battra pour elles, sauf vous.

Je fis alors une longue promenade au cours de laquelle je décidai de rester en science. Quelque temps après, je découvris que je pouvais faire de la recherche véritable en appliquant à la gravité quantique les méthodes utilisées par les physiciens des particules. Si cela signifiait, pour l'instant, mettre de côté les questions des fondements. Il était pourtant merveilleux d'inventer de nouvelles formulations et de les utiliser pour mes calculs.

Pour le remercier d'avoir sauvé ma carrière, j'ai envoyé à Feyerabend un exemplaire de ma thèse de doctorat. En réponse, il m'a envoyé son nouveau livre, *La Science dans la société libre* (1979), avec une petite lettre m'invitant à venir le voir si jamais je passais à Berke-

ley. Quelques mois plus tard, je suis allé en Californie pour un colloque sur la physique des particules et j'essayai de le rencontrer, mais la tâche se révéla plutôt difficile. Il n'avait pas d'heures de bureau à l'université et, en fait, pas de bureau du tout. La secrétaire du département de philosophie éclata de rire quand je lui ai demandé un rendez-vous avec Feyerabend et me conseilla de tenter ma chance à son domicile. Je le trouvai dans l'annuaire, il habitait avenue Miller à Berkeley Hills. Je rassemblai tout mon courage, puis téléphonai et demandai poliment à parler au professeur Paul Feyerabend. La personne à l'autre bout du fil, qui qu'elle fût, cria : « Le *Professeur* Paul Feyerabend ! C'est l'autre Paul Feyerabend. Cherchez-le à l'université » – puis raccrocha. Par la suite, je vins donc simplement assister à l'un de ses cours et me rendis compte qu'il n'avait rien contre une petite discussion après le cours. Pendant les quelques minutes qu'il m'accorda, il m'a donné un conseil précieux : « Oui, le monde académique est pourri et vous n'y pouvez rien. Mais ne vous en inquiétez pas. Faites simplement ce que vous voulez. Si vous savez ce que vous voulez faire et si vous insistez, personne ne fera d'effort pour vous arrêter. »

Six mois plus tard, il m'écrivit une seconde lettre qui m'a trouvé à Santa Barbara, où je venais d'accepter un post-doc à l'Institut de physique théorique. Il y racontait qu'il avait discuté avec un jeune étudiant de physique qui, comme moi, portait beaucoup d'intérêt à la philosophie. Voudrais-je bien le rencontrer et le conseiller sur la façon de procéder ? Ce que je souhaitais surtout était une autre occasion de parler avec Feyerabend, je repartis donc à Berkeley et les rencontrai tous deux, dans l'escalier de l'immeuble du département de philosophie (apparemment, cette situation était un cas de proximité unique, quelque chose qu'il ne faisait jamais avec ses collègues). Feyerabend nous invita à déjeuner au restaurant « Chez Panisse », puis nous amena chez lui (dont l'adresse n'était autre qu'avenue Miller à Berkeley Hills), de telle sorte que je puisse discuter avec l'étudiant pendant que Feyerabend regarderait son *soap opera* favori. Sur le chemin, je partageais le siège arrière dans la petite voiture de sport de Feyerabend avec un radeau gonflable qu'il gardait toujours pour le cas où un tremblement de terre de 8 sur l'échelle de Richter le trouverait traversant le Bay Bridge.

Le premier sujet dont Feyerabend nous entretint fut la re-normalisation – une méthode pour traiter les infinis en théorie quantique des champs. À mon grand étonnement, je découvris qu'il connaissait assez bien la physique contemporaine. Il n'était pas contre la science, à l'inverse de ce que m'avaient dit certains de mes professeurs à Harvard. C'était évident qu'il aimait la physique et il était plus à l'aise dans les questions techniques que la plupart des philosophes que j'avais rencontrés. Sa réputation d'hostilité à la science était sans doute due au fait qu'il considérait sans réponse la question de savoir pourquoi elle marche. Était-ce en raison d'une méthode particulière ? Les sorciers pourtant en ont une aussi.

Peut-être la différence, ai-je pris le risque d'avancer, est que la science utilise des maths ? De même l'astrologie, répondit-il et, si on l'avait laissé continuer, il nous aurait expliqué ensuite dans le détail les différents systèmes de calcul utilisés par les astrologues. Ni l'autre étudiant, ni moi-même ne savions quoi répondre quand il avança l'argument que Johannes Kepler, un des plus grands physiciens de tous les temps, fit quelques contributions au

raffinement technique de l'astrologie et que Newton passa plus de temps à l'alchimie qu'à la physique. Se croyait-on de meilleurs scientifiques que Kepler ou Newton ?

Feyerabend était persuadé que la science est une activité humaine, entreprise par des gens opportunistes qui ne suivent aucune logique, ni aucune méthode générale, et prêts à faire tout ce qui est censé augmenter la connaissance, quelle que soit sa définition. La grande question était donc : comment la science fonctionne-t-elle et pourquoi marche-t-elle si bien ? Même s'il avait des contre-arguments pour toutes mes tentatives d'explication, je sentis que, s'il débattait de cette question avec tant de passion, ce n'était pas parce qu'il était contre la science, mais parce qu'il l'aimait.

Alors que l'heure tournait, Feyerabend nous raconta une histoire. Adolescent à Vienne, il était un prodige de la physique, mais ces études furent anéanties quand il fut appelé sous les drapeaux pendant la Seconde Guerre mondiale. Blessé sur le front russe, il s'est retrouvé à Berlin, où, après guerre, il trouva un travail de comédien. Quelque temps plus tard, il se lassa du monde du théâtre et décida de revenir à Vienne pour poursuivre ses études de physique. Il rejoignit un club de philosophes où il découvrit que, de quel côté qu'il se mette, il pouvait l'emporter dans les débats seulement en utilisant ses talents d'acteur. Cela le poussa à se demander si la réussite académique avait un quelconque fondement rationnel. Un jour, les étudiants parvinrent à persuader Ludwig Wittgenstein d'assister à une séance de leur club. Feyerabend en était tellement impressionné qu'il décida de faire de la philosophie. Il parla avec Wittgenstein, qui l'invita à Cambridge pour suivre ses cours. Mais quand Feyerabend parvint enfin en Angleterre, Wittgenstein était mort ; quelqu'un lui conseilla alors de parler avec Karl Popper, un autre exilé viennois qui enseignait à la London School of Economics. Feyerabend partit donc vivre à Londres et débuta sa vie de philosophe en écrivant des articles où il attaquait le travail de Popper.

Quelques années plus tard, on lui proposa un poste universitaire. Il demanda à un ami comment il pourrait accepter l'idée d'enseigner, lui qui connaissait si peu de choses. Cet ami le persuada d'écrire sur un papier ce qu'il croyait savoir. Feyerabend le fit. Il remplit une seule feuille de papier. L'ami lui dit alors de consacrer sa première conférence à la première phrase, la deuxième conférence à la deuxième phrase, et ainsi de suite. Ainsi, cet étudiant en physique, puis soldat, puis comédien, devint professeur de philosophie[22].

Feyerabend nous a ramenés au campus de Berkeley. Avant de nous quitter, il nous a donné son dernier conseil : « Faites ce que vous voulez faire et ne faites pas attention à tout le reste. Jamais, dans toute ma carrière, je n'ai passé cinq minutes à quelque chose que je ne voulais pas faire. » Ce que j'ai plus ou moins fait depuis. Jusqu'à ce jour. Aujourd'hui, j'ai l'impression qu'il nous faut parler non seulement des idées scientifiques, mais aussi du processus scientifique. Il n'y a pas le choix. Nous avons envers les générations futures la responsabilité de déterminer pourquoi nous avons eu beaucoup moins de réussites que nos maîtres.

Depuis ma visite chez Feyerabend, mort en 1994 à l'âge de soixante-dix ans, j'ai joué le maître pour quelques jeunes gens de talent passés par des crises semblables à la mienne. Mais je ne peux pas leur dévoiler ce que je me disais étant jeune : que le style dominant a connu un succès si spectaculaire qu'il faut le respecter et le satisfaire. Aujourd'hui, je ne

peux qu'être d'accord avec mes collègues plus jeunes : le style dominant ne semble pas réussir.

Tout d'abord, il n'a pas mené à plus de progrès. Le style dominant, celui que j'ai appris à Harvard, a réussi à établir le modèle standard, mais il échoua au-delà. Trente ans plus tard, on doit se demander si ce style a vécu trop longtemps, de sorte qu'il aurait survécu à sa propre utilité. Peut-être l'actualité nécessite-t-elle un style plus réflexif, plus risqué et philosophique, celui d'Einstein et de ses amis ?

Le problème est beaucoup plus vaste que la seule théorie des cordes ; il fait intervenir des valeurs et des attitudes communes à l'ensemble de la communauté physique. Pour le dire simplement, la communauté physique est structurée de telle façon que les grands programmes de recherche qui se promeuvent de manière agressive ont un avantage par rapport aux programmes de recherche plus petits, qui font des déclarations plus prudentes. Par conséquent, les jeunes chercheurs ont plus de chances de réussir s'ils impressionnent les chercheurs plus âgés au moyen de solutions techniquement élégantes à des problèmes posés de longue date dans les programmes de recherche dominants. Tenter de faire l'inverse, réfléchir en profondeur et de façon indépendante et essayer de formuler ses propres idées, est une mauvaise stratégie pour qui aspire au succès.

La physique se révèle, en conséquence, incapable de résoudre ses problèmes cruciaux. Le moment est venu d'inverser les choses : encourager les nouveaux projets de recherche, des projets petits et risqués, et décourager les approches bien ancrées. Il faut que nous donnions l'avantage aux Einstein – aux gens qui savent réfléchir par eux-mêmes et qui ignorent les idées déjà établies des scientifiques seniors.

Mais pour convaincre les sceptiques, il faut répondre à la question de Feyerabend : comment marche la science ?

Deux points de vue opposés sur la science semblent coexister. Selon le premier, elle est un domaine pour les rebelles, les individus qui arrivent avec de nouvelles grandes idées et qui passent toute leur vie à les démontrer. C'est le mythe de Galilée, et nous le voyons se réaliser aujourd'hui dans les efforts de quelques scientifiques pour qui on a la plus grande admiration, comme le physicien mathématicien Roger Penrose, le théoricien de la complexité Stuart Kauffman ou la biologiste Lynn Margulis. Le second point de vue considère la science comme une communauté conservatrice, consensuelle, qui ne tolère que peu de déviation de la pensée orthodoxe et canalise l'énergie créative dans le but de poursuivre les programmes de recherche bien établis.

Dans certains cas, ces points de vue sont tous deux corrects. La science a besoin à la fois du rebelle et du conservateur. Au premier abord, cela semble paradoxal. Comment une entreprise pourrait-elle fleurir pendant des siècles en faisant coexister le rebelle et le conservateur ? L'astuce est de rapprocher pour toute la durée de leurs vies le rebelle et le conservateur, même s'ils ne se sentent pas à l'aise, à l'intérieur de la communauté et également, dans une certaine mesure, à l'intérieur de chaque individu. Mais comment y parvient-on ?

La science est une démocratie et chaque scientifique y a une voix, mais la règle générale n'y est pas la loi de la majorité. Pourtant, quoique le jugement personnel soit aussi mis en

valeur, le rôle du consensus y est crucial. En effet, sur quoi puis-je me reposer lorsque la majorité de mes collègues embrassent un programme de recherche que je n'accepte pas, alors que cela m'apporterait des avantages ? La réponse est qu'il y a beaucoup plus dans la démocratie que la loi de la majorité. Il existe un système d'idéaux et un système éthique qui transcendent le pouvoir de la majorité.

Ainsi, si l'on veut avancer la thèse que la science est plus qu'une sociologie, plus que la politique académique, on doit construire une science qui, tout en restant cohérente, dépassera l'idée d'une communauté autonome d'êtres humains. Pour dire qu'une forme particulière d'organisation ou tel ou tel comportement sont bons ou mauvais pour la science, on doit constituer un fondement sur lequel on fera des jugements de valeur, qui dépassera les critères de popularité momentanée, un fondement sur lequel on appuiera son désaccord avec la majorité, sans pourtant être taxé d'excentrique.

Commençons par diviser la question de Feyerabend en quelques questions plus simples. On peut dire que la science avance quand les scientifiques parviennent au consensus sur telle ou telle question. Quels sont les mécanismes qui régissent ce consensus ? Avant qu'il soit atteint, il existe souvent des controverses. Quel est le rôle du désaccord dans la progression du progrès scientifique ?

Pour répondre à ces questions, il faut revenir aux positions des philosophes antérieurs. Dans les années 1920 et 1930, un mouvement philosophique, appelé « positivisme logique », prit de l'ampleur à Vienne. Les positivistes logiques pensaient que les affirmations deviennent connaissance une fois qu'elles sont vérifiées par les observations du monde réel. Ils proclamaient aussi que la connaissance scientifique est une somme de ces affirmations vérifiées. La science progresse quand les scientifiques avancent des propositions qui ont un contenu vérifiable et par la suite vérifié. La motivation des positivistes était de débarrasser la philosophie de la métaphysique qui avait rempli de gros livres à l'époque précédente avec des affirmations sans aucun rapport avec la réalité. Ils ont partiellement réussi dans leur tâche, mais leur modeste représentation de la science ne survécut pas longtemps. Beaucoup de problèmes demeuraient, parmi lesquels l'absence de correspondance gravée dans la pierre entre ce qu'on observe et ce qu'on en dit. Les présupposés et les préjugés vont se nicher au cœur des descriptions des observations les plus simples. Ce n'est pas pratique, c'est même peut-être impossible, de diviser le contenu de ce que disent les scientifiques, ou de le casser en de petits atomes dont chacun correspondrait à une observation libérée de toute théorie.

Après l'échec du vérificationnisme, des philosophes avancèrent l'idée que la science progresse parce que les scientifiques suivent une méthode dont il existe une garantie qu'elle mène à la vérité. Des propositions pour définir en quoi consiste cette méthode scientifique furent le fait de philosophes comme Rudolf Carnap et Paul Oppenheim. Karl Popper fit, lui aussi, une proposition, dont l'essence était que la science progresse quand les scientifiques proposent des théories falsifiables : c'est-à-dire, des théories qui contiennent des affirmations que l'expérience pourrait contredire. Suivant Popper, une théorie ne peut jamais être prouvée, mais si elle survit à de nombreuses tentatives de la *falsifier*, alors on peut commencer à la croire – au moins, jusqu'à ce qu'elle soit enfin falsifiée[23].

Feyerabend débuta ses recherches philosophiques en attaquant ces idées. Par exemple, il a montré que falsifier une théorie n'est pas chose si simple. Souvent, les scientifiques continuent de croire en une théorie après que celle-ci, en toute vraisemblance, a été falsifiée ; ils le font en modifiant l'interprétation de l'expérience. Ou, encore, ils remettent en question les résultats eux-mêmes. Parfois cela aboutit à une impasse, car la théorie est réellement fausse. D'autres fois, garder une théorie en vie malgré sa contradiction apparente avec l'expérience s'avère une bonne stratégie. Comment décider devant quelle situation on se trouve ? Selon Feyerabend, on ne le peut pas. Différents scientifiques ont des positions différentes et ils parient chacun à leur façon sur le résultat qui sera confirmé expérimentalement. Il n'existe pas de règle générale pour savoir quand il faut abandonner une théorie, ou quand il faut la garder en vie.

Feyerabend a aussi combattu l'idée selon laquelle la méthode serait une clef du progrès scientifique, en montrant qu'aux moments critiques, les scientifiques avancent en s'affranchissant des règles. Qui plus est, Feyerabend argumentait de façon convaincante, du moins à mon avis, que la science s'engagerait dans une impasse si l'on suivait toujours les règles de « la méthode ». L'historien des sciences Thomas Kuhn a lui aussi combattu la notion de « méthode scientifique » lorsqu'il a démontré que les scientifiques suivent des méthodes différentes à des moments différents. Mais il était moins radical que Feyerabend ; Kuhn a essayé de distinguer deux méthodes : celle de la « science normale » et celle des révolutions scientifiques[24].

Une autre critique des idées de Popper fut menée par le philosophe hongrois Imre Lakatos. Elle consiste à dire qu'il n'y a pas autant d'asymétrie que Popper le croyait entre la vérification et la falsification. Si nous voyons un cygne rouge, nous ne serions pas pour autant prêts à renoncer à la théorie qui dit que tous les cygnes sont blancs ; au contraire, il est plus probable que nous irons chercher la personne qui a coloré ce cygne en rouge[25].

Ces arguments laissent en suspens quelques problèmes, qu'il nous faut confronter. Le premier est que le succès de la science a toujours besoin d'être expliqué ; le second (décrit partiellement par Popper) est qu'il devient impossible de distinguer les sciences, comme la physique ou la biologie, des autres systèmes de croyances tels que le marxisme, la sorcellerie ou le dessein intelligent, qui se proclament aussi scientifiques[26]. Si aucune distinction de ce genre ne peut être faite, alors la porte est ouverte à une espèce terrifiante de relativisme, selon laquelle toutes les affirmations concernant la vérité ou la réalité sont sur le même pied, qu'elles proviennent de la science ou d'un système de croyances.

Quoique je sois convaincu – comme beaucoup de scientifiques pratiquants – que nous ne suivons aucune méthode unique, je suis aussi persuadé que nous devons fournir une réponse à Feyerabend. Nous pouvons l'aborder par la question du rôle que la science a joué dans la culture humaine.

La science est l'un de ces instruments de la culture humaine qui émergent en raison de la situation des hommes depuis l'époque préhistorique : nous, qui rêvons d'espace et de temps infini, de l'infiniment beau et de l'infiniment bien, appartenons simultanément à plusieurs mondes : le monde physique, le monde social, le monde de l'imagination et le monde spirituel. La quête des moyens qui fournissent le pouvoir sur ces différents mondes

est inhérente à la condition humaine. Ces moyens portent les noms de science, de politique, d'art et de religion. Aujourd'hui comme lors des premiers jours, ils nous donnent la force de vivre nos vies et constituent le fondement de nos espoirs.

Quel que soit le nom qu'on leur donne, il n'y a jamais eu de société humaine sans science, sans politique, sans art et sans religion. Dans les cavernes dont les murs étaient ornés des peintures des chasseurs préhistoriques, nous avons trouvé des os et des pierres ornés de motifs montrant que les gens comptaient quelque chose par groupe de quatorze, vingt-huit ou vingt-neuf. L'archéologue Alexander Marshack, auteur du livre *Les Racines de la civilisation*, interprète ces os et ces pierres comme des observations des phases de la lune[27]. Ils pourraient tout aussi bien être liés aux premières méthodes de contrôle des naissances. Quoi qu'il en soit, ils montrent qu'il y a vingt mille ans, les êtres humains utilisaient les mathématiques pour organiser et conceptualiser leur expérience de la nature.

La science n'a pas été inventée. Elle a évolué au cours du temps chaque fois que les hommes découvraient les instruments et les capacités qui leur permettaient de comprendre le monde physique. Par conséquent, la science est ce qu'elle est en raison de ce qu'est la nature – et de notre façon d'être. Beaucoup de philosophes se trompaient en essayant de trouver une explication du bon fonctionnement de la science qui s'appliquerait à tous les mondes possibles. Une telle chose ne peut pas exister. Une méthode qui fonctionnerait dans tous les univers possibles serait comme une chaise dans laquelle tout animal serait installé aussi confortablement que les autres ; dans une telle chaise, tous seraient assis de manière également inconfortable.

En effet, il est possible de démontrer une version de cette affirmation. Supposez que les scientifiques soient comme des explorateurs aveugles qui cherchent le sommet le plus haut de leur pays. Ils ne peuvent pas le voir, mais ils possèdent un sens de l'orientation qui leur permet de savoir si l'on monte ou si l'on descend, et ils ont un altimètre qui donne à voix haute l'altitude où ils se trouvent. Ils ne peuvent donc pas *voir* s'ils se trouvent au sommet, mais ils le sauront parce qu'une fois arrivés au sommet, ils descendront quelle que soit la direction du mouvement. Le problème est qu'il peut y avoir plusieurs sommets, et si vous ne pouvez pas voir, il est difficile de vous assurer que celui sur lequel vous vous trouvez est le plus haut. Par conséquent, il n'est pas évident qu'il existe une stratégie que les explorateurs aveugles puissent suivre pour trouver le sommet le plus haut en un minimum de temps. C'est un problème que des mathématiciens avaient étudié, et ils ont prouvé qu'il était impossible de le résoudre. Le théorème appelé « pas de déjeuner gratuit », élaboré par David Wolpert et William Macready, énonce qu'aucune stratégie ne fera mieux sur un paysage donné que la simple promenade aléatoire[28]. Pour concevoir une meilleure stratégie, il aurait fallu détenir de l'information sur le paysage. Le type de stratégie qui marchera bien au Népal marchera très mal aux Pays-Bas.

Il n'est alors guère étonnant que les philosophes soient incapables de découvrir une stratégie générale qui expliquerait comment la science fonctionne. Les stratégies qu'ils ont inventées ressemblent d'ailleurs assez peu au travail scientifique. Ce n'est qu'avec le temps que les stratégies qui réussissent furent révélées, et celles-ci sont propres à chaque discipline scientifique.

Une fois qu'on a compris cela, on peut identifier les caractéristiques de la nature qu'exploite la science. La plus importante est que la nature est relativement stable. En physique et en chimie, il est facile de monter des expériences dont les résultats sont reproductibles, mais cela aurait pu ne pas être ainsi : par exemple, la reproductibilité est moins manifeste en biologie et encore beaucoup moins en psychologie. Pourtant, dans les domaines où les expériences sont reproductibles, il convient de décrire la nature en termes de lois. Ainsi, dès le commencement, les spécialistes de la physique se sont occupés de la découverte de lois générales. Ce qui est en jeu ici n'est pas la question de savoir si les lois fondamentales existent ou pas ; ce qui compte pour la façon dont nous faisons de la science est la question de savoir s'il y a des régularités que nous pouvons découvrir et sur lesquelles nous pouvons construire des modèles, en utilisant des instruments que nous pouvons construire de nos propres mains.

Il s'avère que nous vivons dans un monde ouvert à notre compréhension, ce qui a toujours été le cas. Dès l'origine, l'humanité observait des régularités dans le ciel et dans le changement des saisons, dans les migrations des animaux et la croissance des plantes, dans nos cycles biologiques. En les enregistrant sur les os et les pierres, elle laissait les marques de ces régularités et se rendait ainsi capable de les corréler et d'utiliser cette connaissance à son bénéfice. Tout au long du chemin qui l'a conduite jusqu'aux expériences actuelles avec des télescopes géants, de puissants microscopes et des accélérateurs de plus en plus grands, elle répétait ceci : utiliser la technologie du moment pour découvrir le modèle des choses qui se présentent à elle.

La science marche car nous vivons dans un monde de régularités, mais également en raison de quelques particularités de notre constitution. En particulier, *nous sommes champions pour tirer des conclusions à partir d'une information incomplète*. Nous observons sans cesse le monde, nous faisons ensuite des prédictions et nous en tirons des conclusions. C'est ce que font les chasseurs-cueilleurs, et c'est aussi ce que font les physiciens des particules et les microbiologistes. Nous ne possédons jamais une information qui soit suffisante pour justifier entièrement les conclusions que nous en tirons. Être capable d'agir sur la base de conjectures et d'intuitions, et de le faire en toute confiance alors que l'information que nous possédons tend vers quelque chose sans en constituer la preuve, est une capacité essentielle qui fait de qui la possède un homme d'affaire à succès, un bon chasseur, un bon agriculteur ou un bon scientifique. Cette capacité est en grande partie responsable du succès de l'espèce humaine.

Son coût est élevé : on se trompe facilement. Certes, nous savons que les autres peuvent facilement nous tromper. Si le mensonge est fortement sanctionné, c'est précisément parce qu'il est très efficace. Après tout, c'est parce que nous sommes conçus pour être capables de tirer des conclusions à partir d'une information incomplète que nous sommes vulnérables au mensonge. Notre posture fondamentale ne peut être que la confiance, car si nous étions obligés de tout démontrer nous-mêmes, nous ne pourrions jamais croire autrui. Nous n'aurions, non plus, jamais fait quoi que ce soit : ni nous lever de notre lit, ni nous marier, ni devenir amis ou conclure des alliances. Sans la capacité de faire confiance, nous

serions des animaux solitaires. Le langage n'est efficace et utile que parce que la plupart du temps, nous croyons ce que disent les autres.

Ce qui est important – et dégrisant en même temps – est la fréquence avec laquelle nous nous trompons. Et nous nous trompons non seulement individuellement, mais également en masse. La tendance d'un groupe humain à se mettre rapidement à croire quelque chose que les membres individuels du groupe, plus tard, verront comme évidemment faux, est réellement ahurissante. Certaines parmi les pires tragédies du siècle dernier survinrent lorsque des gens bien intentionnés se laissèrent tenter par les solutions faciles proposées par des leaders mal intentionnés. Le consensus fait partie de nous, car il est essentiel à un groupe de chasseurs qui veut réussir sa chasse ou à une tribu souhaitant échapper à un danger imminent.

Par conséquent, pour qu'une communauté survive, il doit y avoir des mécanismes de correction : les anciens qui freinent l'impulsivité des plus jeunes, parce que s'ils ont appris quelque chose de leurs longues vies, c'est la fréquence élevée avec laquelle ils se sont trompés ; les jeunes qui remettent en question les croyances tenues pour vraies et sacrées pendant des générations, quand ces croyances ne leur conviennent plus. La société humaine a progressé parce qu'elle a appris à demander à ses membres à la fois la rébellion et le respect et parce qu'elle a découvert des mécanismes sociaux qui équilibrent au cours du temps ces deux qualités.

Je crois que la science est un de ces mécanismes. C'est une façon de nourrir et d'encourager la découverte des connaissances nouvelles, mais plus encore, c'est un ensemble de métiers et de pratiques qui, au cours du temps, se montrèrent efficaces pour démasquer les erreurs. C'est notre meilleur instrument dans notre lutte constante pour dépasser notre tendance innée à nous tromper et à tromper les autres.

Après ce bref tour d'horizon, nous voyons ce que la science et le processus démocratique ont en commun. La communauté scientifique et la communauté au sens large ont, toutes deux, besoin de parvenir à des conclusions et de prendre des décisions fondées sur une information incomplète. Dans les deux cas, l'incomplétude de l'information mène à la formation de factions qui développent des opinions divergentes. Les sociétés – scientifiques ou pas – élaborent des mécanismes nécessaires pour résoudre les désaccords et réconcilier les divergences d'opinion. Ces mécanismes demandent que les erreurs soient démasquées et qu'on permette aux solutions nouvelles de problèmes ingérables de remplacer les solutions antérieures. Dans la société humaine, il existe beaucoup de tels mécanismes, dont certains font intervenir la force et la coercition. L'idée essentielle de la démocratie est que la société ira mieux lorsque les désaccords seront résolus pacifiquement. Par conséquent, la science et la démocratie ont en commun la tendance tragique mais ordinaire de se duper, mais aussi la croyance optimiste qu'en tant que société, nous savons corriger les erreurs qui, au cours du temps, nous rendent, pris tous ensemble, plus sages que n'importe quel individu en particulier.

Maintenant que la science a été replacée dans le contexte approprié, nous pouvons nous tourner vers la question de savoir pourquoi elle marche si bien. Je crois que la réponse est simple : *la science a connu le succès parce que les scientifiques constituent une communauté qui*

se définit et est maintenue par l'adhésion à une éthique commune. Je crois que c'est l'adhésion à l'éthique – et non à une théorie ou à un fait particulier – qui sert de correctif fondamental à la communauté scientifique.

Cette éthique repose sur deux principes :

1. Si une question peut être résolue par des personnes de bonne foi appliquant une argumentation rationnelle à des indications expérimentales publiquement accessibles, alors cette question doit être tenue pour résolue.
2. Si, au contraire, l'argument rationnel construit sur la base de preuves publiquement accessibles ne réussit pas à mettre les gens de bonne foi d'accord sur la question donnée, alors la société doit permettre, et même encourager, que les personnes en tirent des conclusions divergentes.

Je crois que la science réussit parce que les scientifiques adhèrent à ces deux principes, même de façon imparfaite. Pour comprendre pourquoi, jetons un coup d'œil sur certaines choses que ces deux principes nous commandent de faire :

- Nous acceptons d'argumenter rationnellement et de bonne foi à partir de résultats expérimentaux partagés, aussi loin que le justifient les résultats.
- Chaque scientifique particulier est libre de développer ses conclusions à partir des résultats expérimentaux existants. Il est également obligé de soumettre à la considération de l'ensemble de la communauté ses arguments en faveur des conclusions tirées. Ses arguments doivent être rationnels et construits sur la base des résultats auxquels tous les membres de la communauté ont accès. Les résultats, les moyens à l'aide desquels ils ont été obtenus et la logique des arguments qui ont permis d'en tirer des conclusions doivent être partagés ou ouverts à l'examen par tous les membres de la communauté.
- La capacité des scientifiques à déduire des conclusions fiables à partir de données expérimentales partagées est fondée sur la maîtrise des instruments et des procédures élaborées au cours des années. Elles sont apprises car l'expérience a montré qu'elles mènent souvent à des résultats fiables. Chaque scientifique est, à l'issue de sa formation, profondément conscient de la possibilité d'erreur et d'illusion.
- En même temps, chaque membre de la communauté scientifique reconnaît que notre but est de parvenir éventuellement au consensus. Celui-ci peut vite émerger, ou après un certain temps. Les juges ultimes de l'œuvre scientifique sont les membres de la communauté qui seront actifs dans un futur suffisamment éloigné pour pouvoir évaluer les preuves de façon objective. Bien qu'un programme de recherche puisse réussir pendant un certain temps et avoir des adeptes, aucun programme de recherche, ni aucune affirmation ou opinion, ne peuvent réussir à long terme s'ils ne produisent pas assez de preuves pour persuader les sceptiques.
- L'adhésion à la communauté scientifique est ouverte à tout être humain. Les considérations de statut social, âge, sexe ou tout autre caractéristique personnelle ne peuvent jouer aucun rôle dans la considération des arguments et des preuves avancées par le scientifique et ne peuvent en aucun cas limiter l'accès d'un membre de la communauté aux moyens de dissémination des résultats expérimentaux, des arguments rationnels et

de l'information. Pourtant, l'entrée dans la communauté n'est possible que si les deux critères suivants sont satisfaits : le premier est la maîtrise d'au moins un métier scientifique, à un degré tel qu'on est capable de travailler de façon autonome et indépendante et de produire des résultats qui seront appréciés par les autres membres comme étant d'une bonne qualité. Le second critère est l'allégeance et l'adhésion continue à l'éthique commune.

- Bien que des orthodoxies puissent s'établir temporairement comme des sous-domaines, la communauté reconnaît que les opinions et les programmes de recherche divergents sont nécessaires pour la maintenir en bonne santé.

Quand quelqu'un se joint à la communauté scientifique, il abandonne des désirs infantiles mais universels : apporter sans cesse la preuve de son infaillibilité et être en possession de la vérité absolue. En échange, il participe à une entreprise continue qui, au cours du temps, achève ce que qu'aucun individu ne pourrait achever seul. Il reçoit également la formation d'expert dans un métier et, dans la majorité des cas, il apprend beaucoup plus que s'il avait dû apprendre seul. Ensuite, en échange de l'effort consenti dans la pratique de leur métier, la communauté assure le droit de chaque participant à défendre toute opinion et tout programme de recherche qu'il ou elle croit soutenu par des résultats pratiques.

Je voudrais appeler ce genre de communauté, où la participation se définit par l'adhésion à un code éthique et à la pratique de métiers élaborés pour les réaliser, une *communauté éthique*. La science, me semble-t-il, représente le plus pur exemple d'une telle communauté.

Mais il n'est pas suffisant de caractériser la science comme communauté éthique, parce que certaines communautés éthiques existent afin de préserver la connaissance existante plutôt que pour découvrir des vérités nouvelles. Dans beaucoup de cas, les communautés religieuses satisfont aux critères de ce qu'est une communauté éthique. En effet, la science sous sa forme moderne s'est développée d'abord dans les monastères et les écoles théologiques : des communautés éthiques dont le but était de maintenir le dogme religieux. Par conséquent, si notre caractérisation de la science se veut valable, nous devons y ajouter des critères qui distingueront clairement un département de physique d'un couvent.

Pour ce faire, je voudrais introduire une deuxième notion que j'appelle « communauté imaginative ». C'est une communauté *dont l'éthique et la structure intègrent la croyance en l'inévitabilité du progrès et l'ouverture vers l'avenir*. Cette ouverture permet l'innovation et la surprise, dans l'imagination et sur le plan institutionnel. Cela nécessite la foi en un avenir meilleur, mais aussi la certitude qu'il est impossible de prévoir comment cet avenir sera atteint.

Un état marxiste ou un état religieux fondamentaliste ne sont pas des communautés imaginatives. Il n'est pas exclu qu'ils cherchent aussi un avenir meilleur, mais ils croient savoir précisément comment l'atteindre. Dans les termes de ma grand-mère marxiste, souvent entendus lorsque j'étais enfant, ils sont sûrs d'avoir raison car leur « science » leur apprend « la bonne analyse de la situation ».

La communauté imaginative croit que l'avenir apportera des surprises sous la forme de découvertes nouvelles et de nouvelles crises à surmonter. Au lieu de mettre la foi dans la connaissance acquise, les participants à cette communauté consacrent leurs espoirs et leurs attentes à l'avenir, aux générations futures, en leur laissant des préceptes éthiques et des instruments de pensée – individuelle et collective – qui leur permettront de surmonter et de tirer partie de circonstances actuellement hors de portée de notre imagination.

Les bons scientifiques s'attendent à ce que leurs élèves les surpassent. Bien que le système académique donne à un scientifique qui a connu le succès des raisons de croire à sa propre autorité, tout bon scientifique sait que lorsqu'il croit en savoir plus que ses meilleurs étudiants, il cesse d'être scientifique.

Ainsi, *la communauté scientifique est à la fois une communauté éthique et une communauté imaginative*.

Ce qui doit être très clair à partir de la description que j'ai donnée ci-dessus est que cette controverse est essentielle à l'avancement de la science. Mon premier principe affirme que lorsque les résultats expérimentaux nous prouvent qu'il faut s'en remettre à un consensus, alors nous devons le faire. Mais mon second principe dit que, jusqu'à ce moment, il faut encourager une grande diversité d'opinions. Cela fait du bien à la science – et c'est un point souvent répété par Feyerabend, si je l'ai bien compris. La science avance plus vite quand il existe des théories concurrentes. Le point de vue ancien, naïf, est qu'on propose les théories une par une et qu'on les teste avec les données expérimentales disponibles. Ceci ne tient pas compte de la façon dont nos idées théoriques influencent notre choix d'expériences à réaliser et les interprétations que nous leur donnerons. Si l'on ne considère qu'une seule théorie à la fois, il est probable qu'on sera intellectuellement piégé par cette théorie. La seule voie pour en sortir est de mettre les différentes théories en compétition pour expliquer les mêmes données expérimentales.

Feyerabend disait que même dans les cas où il existe une théorie largement acceptée, en accord avec toutes les données, il est toujours nécessaire d'inventer des théories concurrentes, pour faire avancer la science. Il en est ainsi parce que la théorie concurrente proposera probablement des expériences contredisant l'opinion établie, des expériences qui n'auraient peut-être même pas été conçues si cette théorie concurrente n'avait pas été explorée. Par conséquent, ce sont les théories concurrentes qui donnent naissance aux anomalies expérimentales. L'inverse est souvent vrai aussi.

Feyerabend a insisté sur le fait que les scientifiques ne doivent jamais être d'accord s'ils n'y sont pas obligés. Quand les scientifiques s'accordent trop rapidement, avant que les résultats et les données les y forcent, la science est en danger. Il faut alors se demander ce qui a exercé une telle influence sur les scientifiques, de sorte qu'ils sont parvenus à une conclusion prématurée. Puisqu'ils sont tous des êtres humains, la réponse sera, selon toute vraisemblance, que ce sont les mêmes facteurs qui poussent les gens à se mettre d'accord sur toute sorte de choses qui ne dépendent ni de résultats ni de données, depuis les croyances religieuses jusqu'aux grandes tendances de la culture populaire.

La question est alors : veut-on que les scientifiques parviennent à un accord parce qu'ils désirent être aimés ou être considérés comme brillants par d'autres scientifiques, ou parce

que tout le monde autour d'eux pense la même chose, ou parce qu'ils aiment bien être du côté de ceux qui gagnent ? La majorité des gens seront tentés d'être d'accord avec les autres à cause de ce genre de motivations, dont il n'y a pas de raison que les scientifiques soient à l'abri, car, après tout, ils sont aussi des êtres humains.

Pourtant, il faut se battre contre ces motivations si l'on veut maintenir la science en vie. Il faut encourager la tendance contraire, qui est de ne pas être d'accord aussi longtemps que l'expérience le permet. Étant donné combien les êtres humains veulent être aimés, faire partie d'un groupe, être du côté des gagnants, il faut être très clair : quand on succombe à ces envies, on déçoit la science.

Il existe d'autres raisons pour lesquelles une communauté scientifique saine doit entretenir le désaccord. La science avance quand nous sommes obligés d'être d'accord avec quelque chose à quoi nous ne nous attendions pas. Si l'on croit *connaître* la réponse, on s'appliquera à ce que tous les résultats concordent avec notre présomption. C'est la controverse qui fait bouger la science et la maintient en vie. Dans un monde remplie de controverses sur des positions concurrentes, les forces sociologiques ne suffisent pas à mettre tout le monde d'accord. Alors, dans les quelques cas où l'on parvient tout de même au consensus, celui-ci se produit parce qu'il ne nous reste plus de choix. Les résultats de l'expérience nous forcent aux consensus, même si cela ne nous plaît pas. C'est pourquoi le progrès en science est réel.

Il existe quelques objections évidentes à cette définition de la science. Premièrement, on observe chez les membres de la communauté scientifique des violations nettes de cette éthique. Il arrive souvent que les scientifiques exagèrent et déforment les preuves obtenues. L'âge, le statut social, la mode, la pression des aînés jouent un rôle dans la façon dont fonctionne la communauté scientifique. Certains programmes de recherche réussissent à rassembler des adhérents et des ressources bien au-delà de ce qui peut être prouvé par les données et les résultats, tandis que d'autres, qui, en fin de compte, obtiennent de bons résultats, sont réprimés par les enjeux sociologiques.

Mais je voudrais souligner quand même que beaucoup de scientifiques adhèrent suffisamment à cette éthique pour qu'à long terme, la science progresse malgré le gaspillage de temps et de ressources dans la promotion et la défense de l'orthodoxie et de la mode. Le rôle du temps doit ici être apprécié. Quoiqu'il arrive à court terme, à l'échelle de dizaines d'années, on accumulera presque toujours les preuves qui finiront par former un consensus, sans tenir le moindre compte de la mode.

Une autre objection possible est que cette définition est logiquement incomplète. Je ne propose pas de critères pour déterminer quels métiers il faut maîtriser. Mais je crois qu'on peut en trouver de meilleurs, quand c'est la communauté elle-même qui sélectionne ces critères pendant des générations. Newton ou Darwin ne pouvaient nullement prédire la gamme d'instruments et de procédures que nous utilisons aujourd'hui.

L'adhésion à l'éthique n'est jamais parfaitement partagée, et il reste donc toujours une place pour l'amélioration de la pratique scientifique. Cela paraît particulièrement vrai aujourd'hui, où la mode semble jouer un rôle beaucoup trop important, au moins en physique. On l'observe chaque fois qu'un jeune docteur ès-sciences, juste après avoir soutenu sa

thèse, vous dit en privé qu'il aurait préféré s'investir dans X, mais qu'il a choisi Y parce c'était la direction ou la technique que préféraient les personnes plus âgées et plus puissantes, et qu'il se sentait obligé de le faire pour prétendre à un poste. Bien sûr, en science comme en d'autres matières, il y aura toujours des chercheurs, peu nombreux, qui choisiront X malgré des preuves très claires que le choix de Y est mieux récompensé à court terme. Parmi ceux-ci, on trouve les candidats les plus probables pour guider la génération suivante. Ainsi, le progrès de la science peut être ralenti par l'orthodoxie ou la mode, mais tant qu'il y aura de la place pour ceux qui choisissent X, on ne l'arrêtera pas complètement.

Tout ceci pour dire que, comme dans toute activité humaine, le succès en science est dû en grande partie au courage et à la force de caractère. Bien que l'avancement de la science repose sur la possibilité d'un consensus à long terme, les décisions d'un scientifique, ce qu'il décide d'investiguer et comment il évalue les preuves, sont toujours fondées sur une information incomplète. La science avance parce qu'elle est construite sur un fondement éthique, qui reconnaît qu'en présence d'une information incomplète, nous sommes tous égaux. Personne ne peut prédire avec certitude qu'une approche mènera au progrès définitif ou à des années de travail perdu. Tout ce que nous pouvons faire, c'est former nos élèves à des métiers dont l'expérience a montré qu'ils mènent le plus souvent à des conclusions fiables. Après avoir acquis cette formation, nous devons les laisser libres de suivre leurs propres intuitions et nous devons leur consacrer du temps pour les écouter quand ils nous les racontent. Tant que la communauté crée sans cesse des occasions pour qu'émergent des idées et des opinions nouvelles, et tant qu'elle adhère au postulat éthique qui exige un consensus fondé sur l'argumentation rationnelle basée sur les preuves universellement disponibles, la science pourra obtenir d'éventuels succès.

Former la communauté scientifique sera une tâche sans fin. Il sera toujours nécessaire de se battre contre la domination de l'orthodoxie, de la mode, de l'âge et du statut social. La tentation de suivre un chemin facile, de s'inscrire dans une équipe « gagnante » au lieu d'essayer de comprendre le problème par soi-même, sera toujours présente. Au mieux, la communauté scientifique profite de nos meilleures intuitions et de nos désirs tout en nous protégeant des pires de nos impulsions. La communauté marche, en partie, en bridant l'arrogance et l'ambition que tous, à des moindres degrés, apportent à la recherche. Richard Feynman a probablement exprimé ceci mieux que les autres : « La science est le scepticisme organisé dans la fiabilité de l'opinion experte[29]. »

18
Les visionnaires et les artisans

Peut-être y a-t-il un problème de méthode pour mener à bien la révolution physique. J'ai dit au chapitre précédent que la science est une institution humaine, assujettie aux manies humaines, et fragile, puisqu'elle dépend autant de l'éthique du groupe que de l'éthique individuelle. Elle pourrait être en panne, et je crois que c'est le cas.

Une communauté se trouve souvent contrainte de penser d'une façon particulière en raison de son organisation. Une question importante est donc la suivante : l'organisation actuelle reconnaît-elle et récompense-t-elle la bonne physique et les bons physiciens, ceux qui nous aideront à résoudre les problèmes actuels ? Sa contrepartie cognitive est la suivante : pose-t-on les bonnes questions ?

Un point d'accord entre tous les inquiets à propos de la physique fondamentale, est le besoin d'idées nouvelles. Depuis les critiques les plus virulents jusqu'aux avocats les plus acharnés de la théorie des cordes, tous disent qu'il manque quelque chose d'important. C'est ce sentiment qui conduisit les organisateurs du colloque annuel des cordes, en 2005, à ouvrir une session intitulée « La Prochaine révolution des supercordes ». Et bien que ceux qui travaillent dans d'autres domaines de la physique aient de plus en plus confiance en leur travail, chaque physicien de ma connaissance sera d'accord pour dire qu'il manque probablement une percée essentielle.

Comment peut-on trouver cette idée manquante ? Soit quelqu'un doit admettre qu'il existe un présupposé faux, soit il doit se poser une question nouvelle ; c'est d'une telle personne dont nous avons besoin pour garantir l'avenir de la physique fondamentale. Le problème de l'organisation est ainsi clairement posée : avons-nous un système qui permette à cette personne de dénicher ce faux présupposé, ou de poser la bonne question, tout en faisant partie de la communauté scientifique actuellement soutenue et (ce qui est aussi important) écoutée ? Acceptons-nous des rebelles créatifs qui possèdent ce rare talent, ou les exclut-on ?

Il va de soi que les personnes qui posent des questions réellement nouvelles et pertinentes sont des oiseaux rares. De plus, la capacité d'avoir une vision d'ensemble de l'état d'un champ de recherche techniquement complexe et d'y découvrir un présupposé caché ou une nouvelle direction de recherche, est bien distincte de celles qu'on exige, d'ordinaire,

comme des conditions préalables pour rejoindre la communauté physique. Être un artisan bien formé à la pratique de son métier est une chose ; être un visionnaire en est une autre, bien différente.

Cette distinction ne signifie pas que le visionnaire ne sera pas un scientifique de haut niveau. Il doit connaître son sujet en profondeur, être capable de manipuler les instruments habituels du métier et communiquer de façon convaincante avec ce langage. Pourtant, un visionnaire n'a pas besoin d'être le physicien le plus doué et le plus compétent sur le plan technique. L'histoire démontre que les chercheurs qui deviennent visionnaires semblent parfois médiocres lorsqu'on les compare à des scientifiques mathématiquement habiles, excellents dans la résolution de problèmes. Le premier exemple est Einstein, qui n'a apparemment pas pu obtenir un poste scientifique décent quand il était jeune. Il était lent à comprendre une argumentation et facile à désorienter ; d'autres étaient beaucoup plus habiles en mathématiques. On raconte qu'Einstein lui-même disait : « Ce n'est pas parce que je suis si intelligent. C'est parce que je reste avec mes problèmes plus longtemps[30]. » Niels Bohr était un cas encore plus extrême. Mara Beller, l'historienne qui a étudié en détail l'œuvre de Bohr, souligne que, dans ses blocs-notes de chercheur, il n'y a pas un seul calcul, mais qu'ils sont remplis de mots et d'images[31]. Louis de Broglie a fait une découverte stupéfiante, à savoir que si la lumière est une particule aussi bien qu'une onde, alors les électrons et les autres particules sont peut-être aussi des ondes. Il a énoncé cette idée dans sa thèse de doctorat, en 1924, qui n'a pas impressionné les examinateurs et qui serait passée inaperçu si Einstein ne l'avait pas approuvée. Autant que je sache, de Broglie n'a jamais fait une autre découverte d'une telle importance. La seule personne qui me vient à l'esprit, qui était à la fois visionnaire et le meilleur mathématicien de son époque, c'est Isaac Newton ; mais presque tout ce qu'on sait de Newton est, en fait, unique et inexplicable.

J'ai déjà dit que Thomas Kuhn faisait la distinction entre science normale et révolution scientifique. La science normale est fondée sur un paradigme, c'est-à-dire une pratique bien définie, comprenant une théorie fixe et un corpus de questions, de méthodes expérimentales et de techniques de calcul. Une révolution scientifique advient quand le paradigme s'écroule, à savoir, à l'instant où la théorie qui est fondée sur elle échoue dans la prédiction ou l'explication d'un résultat expérimental[32]. Je ne crois pas que la science procède toujours de cette façon, mais elle a sans doute des périodes normales et des périodes révolutionnaires, et on fait de la science différemment lors de ces périodes différentes. Ce que je veux faire comprendre, c'est que deux sortes de chercheurs sont importantes, une pour la science normale, l'autre pour la science révolutionnaire. Pendant les périodes normales, on a besoin de chercheurs qui, quelle que soit leur capacité d'imagination (parfois élevée), travaillent efficacement avec les outils techniques ; appelons-les *maîtres artisans*. Pendant les périodes révolutionnaires, on a besoin de *visionnaires* qui sauront montrer la voie dans l'obscurité.

Les maîtres artisans et les visionnaires font de la science pour des raisons différentes. Les premiers décident de s'y consacrer, en majorité, parce qu'ils découvrent à l'école qu'ils en ont la capacité. D'habitude, ce sont les meilleurs élèves en maths et en physique, depuis le

début du lycée jusqu'à la thèse, où ils rencontrent enfin ceux qui leur ressemblent. Ils ont toujours été capables de résoudre les problèmes mathématiques plus vite et avec plus d'exactitude que leurs camarades, et par conséquent la capacité à résoudre les problèmes est ce qu'ils apprécient chez les autres.

Les visionnaires ont un profil très différent. Ils décident de faire de la science parce qu'ils se posent des questions sur la nature de l'existence, auxquelles leurs manuels scolaires ne répondent pas. S'ils n'étaient pas devenus des scientifiques, ils auraient pu devenir peintres ou écrivains, ou intégrer une école de théologie. Il ne faut pas s'attendre à ce que les membres de ces deux groupes se comprennent et se fassent confiance.

Une plainte qui revient souvent parmi les visionnaires est que la formation standard en physique ignore le contexte historique et philosophique de son développement. Einstein a écrit ceci dans une lettre à un jeune professeur qui se voyait refuser d'inclure la philosophie à son cours de physique :

> Je suis tout à fait d'accord avec vous à propos de l'importance et de la valeur éducative de la méthodologie, ainsi que de l'histoire et de la philosophie des sciences. Tant de gens aujourd'hui – et même des scientifiques professionnels – me paraissent comme quelqu'un qui a vu des milliers d'arbres mais n'a jamais contemplé une forêt. La connaissance du fond historique et philosophique donne une espèce d'indépendance vis-à-vis des préjugés dont souffrent la majorité des scientifiques d'une génération. Créée par l'intuition philosophique, cette indépendance est, à mon sens, la marque de distinction entre un artisan ordinaire ou un spécialiste, et le véritable chasseur de la vérité[33].

Certes, quelques chercheurs sont un mélange des deux types. Personne ne peut passer sa thèse s'il n'est pas hautement compétent sur le plan technique. Mais la majorité des physiciens théoriciens que je connais appartiennent nettement à l'un des deux groupes. Qu'en est-il en ce qui me concerne ? Je crois avoir eu le potentiel pour devenir un visionnaire et, en même temps, la chance d'être assez doué dans mon métier pour contribuer parfois à la résolution de problèmes.

Quand j'ai appris pour la première fois les catégories kuhniennes de la science normale et révolutionnaire – j'étais encore en premières années d'université –, j'étais un peu perdu, car je ne pouvais pas dire dans quelle période nous nous trouvions. Si j'en jugeais par le type de questions qui restaient ouvertes, nous étions certainement déjà sur le chemin de la révolution. Mais quand je regardais la façon dont les chercheurs travaillaient autour de moi, il était aussi évident que nous faisions de la science normale. Il y avait un paradigme – le modèle standard de la physique des particules –, des pratiques expérimentales qui l'avaient confirmé, et dans ce paradigme on avançait tout à fait normalement.

Maintenant je comprends que ma confusion était un indice de la crise que j'explore dans ce livre. Nous sommes, en effet, dans une période révolutionnaire, mais nous essayons d'en sortir en utilisant l'organisation et les instruments inadéquats de la science normale.

Ceci est mon hypothèse fondamentale de ce qui s'est passé en physique au cours des vingt-cinq dernières années. Il ne peut pas y avoir de doute sur le fait que la période actuelle est une période révolutionnaire. On est terriblement coincés et on a un grand besoin

de véritables visionnaires. Mais ce besoin existe depuis longtemps. On a eu quelques visionnaires exceptionnels au début du XX^e siècle : Einstein d'abord, mais aussi Bohr, Schrödinger, Heisenberg et quelques autres. Ils n'ont pas achevé la révolution qu'ils avaient eux-mêmes déclenchée, mais ils ont créé des théories partiellement réussies – la mécanique quantique et la relativité générale – pour que nous les élaborions par la suite. Le développement de ces théories a demandé beaucoup de travail technique très difficile et, par conséquent, pendant quelques générations la physique était une science normale dominée par les maîtres artisans. La transition de la domination européenne vers une domination américaine, dans les années 1940, a largement marqué ce triomphe des maîtres artisans sur les visionnaires. Comme nous l'avons vu, cette transition engendra un renversement de style, où le mode réflexif d'Einstein et de ses collègues, orienté vers les fondements, fut remplacé par le mode pragmatique, agressif, qui conduisit à l'apparition du modèle standard.

Quand j'étudiais la physique dans les années 1970, on nous apprenait presque à mépriser ceux qui réfléchissaient aux problèmes des fondements. Lorsque nous posions une question au sujet des fondements de la théorie quantique, la réponse était que personne ne les comprenait bien, mais que se poser de telles questions ne faisait plus partie de la science. Le travail enseigné consistait à prendre la mécanique quantique comme donnée et de l'appliquer aux problèmes nouveaux. L'esprit était au pragmatisme, « Tais-toi et calcule ! » le mantra commun. On traitait les gens qui ne parvenaient pas à faire taire leurs doutes sur la signification de la théorie quantique comme des ratés incapables de poursuivre le travail.

En tant que chercheur arrivé en physique suite à la lecture des méditations philosophiques d'Einstein, je ne pouvais accepter ce genre de raisonnement. Le message était néanmoins clair et je n'avais qu'à le suivre d'aussi près que possible. On ne pouvait faire carrière qu'en considérant la théorie quantique comme donnée, sans jamais se poser des questions à son propos. Des circonstances favorables m'avaient permis de passer un certain temps à l'Institut d'études avancées à Princeton, mais il ne restait rien d'Einstein et de sa conception de la science, seulement son portrait en bronze, vide à l'intérieur, qui observait silencieusement les visiteurs de la bibliothèque.

Mais la révolution n'était pas achevée. Le modèle standard de la physique des particules a sans doute été un triomphe du style pragmatique, mais il semble maintenant qu'il a aussi marqué sa propre limite. Le modèle standard, et peut-être aussi l'inflation, est tout ce que nous avons obtenu avec la science normale. Depuis, on s'est embourbé, et ce dont nous avons besoin pour nous en sortir n'est rien d'autre que le retour d'une vision révolutionnaire de la science. Il nous faut des visionnaires. Le problème est qu'on n'en trouve que très peu. C'est là le résultat de longues années durant lesquelles la science les reconnaissait rarement et ne les tolérait qu'à peine.

Entre le début du XX^e siècle et son dernier quart, la science – et le monde académique en général – sont devenus beaucoup plus professionnels et mieux organisés. On a ainsi conservé religieusement la pratique de la science normale comme modèle unique d'une bonne science. Même si tout le monde se rendait compte qu'une révolution est nécessaire,

les membres les plus puissants de notre communauté auront oublié comment on en fait une. On a essayé avec les structures et les styles de recherche adaptés à la science normale. La situation paradoxale avec la théorie des cordes – beaucoup de promesses, mais très peu de réalisations – est précisément ce qu'on obtient quand on pousse plusieurs maîtres artisans très bien formés à travailler comme des visionnaires.

Je suis sûr que certains théoriciens des cordes vont protester contre cette définition. Certes, ils travaillent sur les problèmes fondamentaux en physique, dans le but de découvrir des lois nouvelles. Pourquoi alors ne sont-ils pas visionnaires ? Les trous de ver, les dimensions supérieures et les univers multiples ne sont-ils pas tous des nouveaux concepts imaginatifs ? Oui, bien sûr, mais ce n'est pas le problème. La question est la suivante : quel est le contexte et de quoi ces idées parlent-elles ? Les dimensions supérieures et les trous de ver ne sont pas des nouveautés, car plus de soixante-cinq ans ont passé depuis Kaluza et Klein. Réfléchir sur ces idées au moment où des centaines d'autres y réfléchissent aussi ne demande pas, non plus, beaucoup de courage ni de prévoyance.

Une façon alternative d'analyser notre situation actuelle est de dire que les visionnaires sont contraints, par leur désir même de clarté, de se colleter avec les problèmes les plus profonds des fondements de la physique. Ceux-ci comprennent les fondements de la mécanique quantique et les problèmes liés à l'espace et au temps. De nombreux articles et livres ont été écrits sur les fondements de la mécanique quantique au cours des dix dernières années, mais, à ma connaissance, aucun ne le fut par un théoricien des cordes de premier plan. Je ne connais pas, non plus, un seul article écrit par un théoricien des cordes qui essayerait de lier les problèmes de la théorie des cordes aux écrits antérieurs de physiciens et de philosophes sur les grandes questions des origines de l'espace, du temps ou de la théorie quantique.

Les leaders de la recherche en gravité quantique indépendante du fond, au contraire, sont plutôt des gens dont les opinions scientifiques se sont formées à la suite d'une longue réflexion sur les fondements. Il est facile de nommer ceux chez qui cette réflexion aboutit à la publication d'articles et même de livres sur ces mêmes problèmes : Roger Penrose, peut-être le plus connu du public, mais aussi beaucoup d'autres comme John Baez, Louis Crane, Bryce DeWitt, Fay Dowker, Christopher Isham, Fotini Markopoulou, Carlo Rovelli, Raphael Sorkin et Gerard 't Hooft.

Or il m'est impossible de me rappeler d'aucun théoricien des cordes appartenant au courant magistral de la théorie qui aurait proposé une idée originale sur les fondements de la théorie quantique ou une idée sur la nature du temps. Les théoriciens des cordes ont tendance à riposte à cette accusation par un geste de mépris, qui signifie qu'on a déjà répondu à toutes ces questions il y a bien longtemps. Quelquefois, ils reconnaissent que les problèmes sont sérieux, mais cet aveu est rapidement suivi de l'affirmation qu'il est trop tôt pour essayer de les résoudre. Souvent, on entend dire qu'il faut continuer de développer la théorie des cordes, parce que, comme cette théorie est vraie, elle fournira les réponses demandées.

Je n'ai rien contre les gens qui pratiquent la science comme un métier artisanal et dont le travail est fondé sur la maîtrise d'une technique. C'est ce qui donne à la science normale

toute sa puissance. Mais c'est une fantaisie de croire que les problèmes des fondements pourront être résolus avec une démarche technique au sein des théories existantes. Si tel était le cas, ce serait merveilleux : cela nous permettrait, à tous, de réfléchir moins, et la réflexion est une chose vraiment ardue même pour ceux qui s'y consacrent volontairement. Mais les problèmes profonds, persistants, ne sont jamais résolus par le pur hasard, seulement par des gens obsédés par ces problèmes et qui ne se consacrent à rien d'autre que leur résolution. Ce sont les visionnaires, c'est pourquoi il est crucial que la science académique les accueille au lieu de les écarter.

La science n'a jamais été organisée d'une façon favorable aux visionnaires ; l'échec d'Einstein d'accéder à un poste universitaire n'en est pas le seul exemple. Mais il y a un siècle, le monde académique était beaucoup plus petit et moins professionnalisé, il était plus commun de rencontrer des personnes extérieures au domaine, bien formées, possédant les connaissances nécessaires. C'était l'héritage du XIX^e^ siècle, quand la majorité des scientifiques étaient des amateurs enthousiastes, assez riches pour ne pas avoir besoin de travailler, ou assez convaincants pour trouver des mécènes.

Très bien, direz-vous. Mais qui sont donc ces visionnaires ? Par définition, ce sont des individus particulièrement autonomes et auto-motivés, qui s'engagent eux-mêmes à faire de la science, au risque de ne pouvoir en vivre. Il doit bien y en avoir quelques-uns quelque part, même si notre monde académique ne leur est pas favorable. Qui sont-ils et qu'ont-ils accompli ?

Les visionnaires se cachent sous nos yeux. On les reconnaît à leur rejet des présupposés de la majorité. Permettez-moi de vous en présenter quelques-uns.

J'ai beaucoup de peine à croire que la relativité restreinte puisse être fausse ; si elle l'est, il existerait un état privilégié de repos et on pourrait mesurer la direction et la vitesse du mouvement de façon absolue. Mais il existe quelques théories qui ne considèrent pas cela comme un problème. Ted Jacobson est un ami avec qui j'ai écrit un article sur les mécanismes quantiques de la gravité à boucles. Ensemble, nous avons trouvé les premières solutions exactes d'une équation clef, connue sous le nom d'équation de Wheeler-DeWitt[34]. Mais, après que la gravité quantique a poursuivi son chemin, Jacobson est devenu sceptique. Il ne croyait pas qu'elle puisse fonctionner, ni qu'on y avait réfléchi assez profondément. Il a alors commencé à se poser des questions sur le principe même de la relativité et il s'est mis à croire en la possibilité d'un état de repos privilégié. Il a passé des années à élaborer cette idée. Aux chapitres 13 et 14, j'ai dit que si la relativité restreinte était fausse, l'expérience pourrait bientôt nous le confirmer. Jacobson et ses étudiants à l'université de Maryland sont parmi les leaders de la recherche des tests expérimentaux de la relativité restreinte.

Un autre visionnaire qui a mis en question tout le cadre de la relativité est le cosmologue João Magueijo (voir chapitre 14). Il n'a pas eu d'autre choix, car il a inventé – il en est même tombé amoureux – une théorie qui avait l'air de contredire la relativité : la vitesse de la lumière aurait été beaucoup plus élevée au début de l'univers. Les articles qu'il a écrits à ce sujet sont à peine cohérents et, sans doute, n'ont aucun sens, sauf si on présuppose le rejet du principe de relativité, ou qu'on le modifie.

Ensuite, il y a des fous en physique des solides, c'est-à-dire des physiciens accomplis qui ont fait des carrières entières, et formidables, à expliquer des effets réels du comportement des choses réelles. Je parle ici de Robert Laughlin, prix Nobel en 1998 pour ses contributions à la « découverte d'une forme nouvelle du fluide quantique aux excitations à charge fractionnaire », de Grigori Volovik de l'institut Landau de physique théorique à Moscou et de Xiao-Gang Wen du MIT, qui ont expliqué le comportement de certaines espèces d'hélium liquide très froid. Ces chercheurs sont à la fois maîtres artisans et visionnaires. Ayant pratiqué pendant quelques dizaines d'années la science normale, avec des résultats importants, ils ont décidé de se consacrer aux problèmes profonds de la gravité quantique et ont commencé par considérer que le principe de relativité était faux, au mieux une approximation ou un phénomène émergent. Le physicien des particules James Bjorken est un autre de ces maîtres artisans visionnaires. Nous lui devons en grande partie la découverte que les protons et les neutrons sont faits de quarks.

Il y a aussi Holger Bech Nielsen de l'institut Niels-Bohr, l'inventeur de la théorie des cordes, qui fit beaucoup d'autres découvertes majeures. Cependant, pendant plusieurs années, il était isolé de la tendance majoritaire parce qu'il soutenait ce qu'il appelait la « dynamique aléatoire ». Il croit que le présupposé le plus utile qu'on puisse faire au sujet des lois fondamentales est qu'elles sont aléatoires. Tout ce que nous croyons être intrinsèquement vrai, comme la relativité et les principes de la mécanique quantique, serait selon lui des faits accidentels qui émergent d'une théorie plus fondamentale, tellement au-delà de ce qu'on est capable d'imaginer qu'il convient aussi bien de croire que les lois sont aléatoires. Ces modèles sont des lois thermodynamiques jadis considérées comme fondamentales, dont on comprend aujourd'hui qu'elles ne sont que le comportement le plus probable d'un grand nombre d'atomes en mouvement aléatoire. Il se pourrait que sa position ne soit pas la bonne, mais Nielsen est allé remarquablement loin dans son programme anti-unification.

La liste de théoriciens des cordes ayant apporté à la science une contribution aussi capitale que les *gentlemen* ci-dessus nommés est très courte. Par conséquent, comment les théoriciens des cordes et les théoriciens des boucles répondent-ils aux alertes continues que leur envoient ces physiciens confirmés, consistant à dire que, peut-être, nous faisons tous fausse route ? Hé bien, ils les ignorent. Oui, vraiment. Pour vous dire la vérité, on se moque d'eux derrière leurs dos, parfois dès qu'ils quittent la salle. Recevoir le prix Nobel (ou faire de la physique à ce niveau) n'est apparemment pas suffisant pour pouvoir questionner tranquillement les présupposés communément admis, comme les théories de la relativité restreinte et générale. J'ai été choqué quand Laughlin me raconta que son département et sa source de financement le mettaient sous pression pour l'inciter à faire de la science normale dans le domaine où il avait travaillé précédemment, au lieu de gaspiller son temps à élaborer des idées nouvelles sur l'espace, le temps et la gravité. Si l'on ne laisse pas un tel chercheur élaborer ses conjectures les plus profondes, après tout ce qu'il a découvert en physique, après qu'il a reçu le Nobel, que signifie exactement la notion de liberté académique ?

Heureusement pour la physique, on saura bientôt si la relativité restreinte est vraie ou pas. La majorité de mes amis s'attendent à ce que des observations expérimentales démontrent que ces grands hommes sont fous. J'espère aussi que les iconoclastes ont tort et que la relativité restreinte passera le test. Mais je ne peux pas m'empêcher de craindre que peut-être avons-nous tort, et eux, raison.

Voilà donc pour la relativité. Mais qu'en est-il si la théorie quantique est fausse ? C'est le talon d'Achille de tout le projet sur la gravité quantique. Si la théorie quantique est fausse, alors essayer de la combiner avec la gravité n'est qu'une considérable perte de temps. Est-ce que quelqu'un pense que c'est le cas ?

Oui. Il s'agit de Gerard 't Hooft. Comme étudiant en thèse à l'université d'Utrecht, 't Hooft a prouvé, avec un collaborateur plus âgé, qu'on pouvait donner un sens précis aux théories quantiques de Yang-Mills – une découverte qui a rendu possible tout le modèle standard – et, pour ce résultat, il a reçu un prix Nobel bien mérité. Ce n'est qu'une des nombreuses découvertes fondamentales à propos du modèle standard. Mais, depuis dix ans, il a été l'un des penseurs les plus profonds sur les problèmes des fondements. Son idée principale s'appelle « principe holographique ». Selon sa propre formulation, celui-ci consiste en ce qu'il n'y a pas d'espace. Tout ce qui se passe dans la région que nous avons l'habitude de penser comme espace peut être représenté comme ayant lieu sur une surface qui entoure cet espace. En plus, la description du monde qui existe sur cette frontière n'est pas la théorie quantique, mais une théorie déterministe dont il croit qu'elle remplacera la théorie quantique.

Juste avant la formulation de ce principe par 't Hooft, une idée similaire fut proposée par Louis Crane dans le contexte des approches à la gravité quantique indépendantes du fond. Il suggéra que la bonne façon d'appliquer la théorie quantique à l'univers n'est pas celle où l'on essaye de traiter l'ensemble de l'univers comme un système quantique unique. C'était la manière de procéder de Stephen Hawking, James Hartle et les autres, qui se heurtèrent tous à de sérieux problèmes. Au lieu d'une telle démarche, Crane suggéra donc que la mécanique quantique n'était pas une description statique du système, mais un enregistrement des informations qu'un sous-système de l'univers pouvait contenir à propos d'un autre en raison de leur interaction. Il a ensuite suggéré l'existence d'une description quantique liée à chaque manière de diviser l'univers en deux parties. Les états quantiques vivent, non pas dans une partie ou une autre, mais sur la frontière entre elles[35].

La suggestion radicale de Crane s'est transformée depuis en toute une série d'approches de la théorie quantique qu'on appelle « théories quantiques relationnelles », parce qu'elles se fondent sur l'idée que la mécanique quantique est une description des relations entre sous-systèmes de l'univers. Cette idée a été élaborée par Carlo Rovelli, qui a montré qu'elle est en parfaite cohérence avec notre façon habituelle de traiter la théorie quantique. Dans le contexte de la gravité quantique, elle a mené à une nouvelle approche de la cosmologie quantique, développée par Fotini Markopoulou et ses collaborateurs. Markopoulou a souligné qu'une description de l'échange d'information entre les différents sous-systèmes est la même chose qu'une description de la structure causale, celle qui met une contrainte sur les influences qu'un système peut exercer sur un autre. Ainsi, elle a découvert qu'un uni-

vers pourrait être décrit en tant qu'ordinateur quantique, avec une logique engendrée dynamiquement[36]. L'idée que l'univers est une espèce d'ordinateur quantique a aussi été avancée par Seth Lloyd de MIT, un des visionnaires dans le champ de la computation quantique[37]. Dans leurs disciplines respectives, Markopoulou et Lloyd sont à la tête du mouvement qui utilise les concepts de la théorie de l'information quantique pour construire une nouvelle vision de l'Univers, qui permettrait de comprendre comment les particules élémentaires peuvent émerger de l'espace-temps quantique.

L'idée de Gerard 't Hooft d'un monde représenté sur sa frontière doit vous rappeler la conjecture de Maldacena. En effet, les idées de 't Hooft ont en partie inspiré Juan Maldacena, et certains pensent que le principe holographique sera un des principes fondamentaux de la théorie des cordes. Ce seul fait pourrait facilement propulser 't Hooft à la tête de la communauté des cordes, à imaginer que cela puisse l'intéresser. Mais, dans les années 1980, 't Hooft a choisi de poursuivre son propre chemin. Il a pris cette décision alors qu'il était au zénith de sa carrière, au moment où personne n'était techniquement plus fort que lui. Pourtant, à l'instant même où il dévia, ses collègues physiciens des particules se moquèrent de lui. Il n'a pas semblé s'en soucier, ni même le remarquer, mais je suis sûr que cela l'a blessé. Néanmoins, il mit en question presque tous les principes de la physique fondamentale et forgea son propre chemin. Sa croyance principale, complexe mais cohérente, élaborée au cours des décennies, est que la physique quantique est fausse.

Il n'existe pas de personnage plus sincère et honnête que 't Hooft. Une des choses que nous, spécialistes de la gravité quantique, admirons chez lui, est qu'il se joint souvent à nous. Il assiste à plusieurs de nos réunions, et pendant ces réunions, on ne le voit jamais dans les couloirs en train de parler politique avec les autres participants. Au contraire, il participe à chaque session, ce que d'habitude seuls les jeunes étudiants font. Il arrive le premier tous les matins, vêtu impeccablement d'un costume trois pièces (les autres portent normalement des jeans et des t-shirts), il s'assoit au premier rang toute la journée et écoute les exposés de tous les étudiants et post-docs. Il n'a pas toujours de commentaire à faire, et il peut même s'endormir une minute ou deux, mais le respect qu'il manifeste par sa présence pour chacun de nos collègues est impressionnant. Quand son tour de parler arrive, il se lève et présente ses idées et ses résultats sans aucune prétention. Il sait que son chemin est un chemin solitaire, et je ne serais pas surpris que cela ne lui déplaise pas. Comment une personne renonce-t-elle aux insignes de chef de file, qu'elle mérite pleinement, juste parce que selon elle la mécanique quantique n'a pas de sens ? Imaginez ce que cela dénote du caractère de cette personne.

Et ensuite, il y a Roger Penrose. Pour le dire en une phrase, personne n'a contribué plus que lui à notre façon d'appréhender et d'utiliser la théorie de la relativité générale, excepté Einstein lui-même. Il est parmi les quatre ou cinq penseurs les plus talentueux et les plus originaux que j'ai rencontrés, toutes disciplines confondues. Penrose a réalisé des prouesses en mathématiques et en physique. De même que 't Hooft, une bonne partie de son travail des vingt dernières années est motivée par sa conviction que la mécanique quantique est erronée. Comme 't Hooft, il a une vision de ce qui doit la remplacer.

Penrose a affirmé pendant des années que l'insertion de la gravité dans la théorie quantique rend cette théorie non linéaire. Cela mène à la résolution du problème de la mesure, par le fait que les effets de la gravité quantique causent un collapse dynamique de l'état quantique. Les idées de Penrose sont bien documentées dans ses livres, quoiqu'à ce jour, on ne les ait pas implémentées sous la forme d'une théorie détaillée. Néanmoins, il a été capable, avec les autres, de les utiliser pour établir des prédictions pour des expériences réalisables, dont certaines sont actuellement en phase de montage.

Peu d'entre nous prennent les arguments de Penrose au sérieux ; une part encore plus petite est convaincue de leur validité. Mais la plupart des théoriciens des cordes – et, sans doute, tous les théoriciens des cordes de la tendance majoritaire – ne manifestent strictement aucun signe d'intérêt. Si même les visionnaires les plus reconnus ne sont pas pris au sérieux quand ils commencent à mettre en question les présupposés fondamentaux, vous pouvez vous imaginer facilement quelle est la vie des visionnaires qui n'ont pas encore eu la chance de faire des contributions substantielles[38].

Si quelques-uns parmi les meilleurs physiciens théoriciens vivants éprouvent le besoin de s'interroger sur les présupposés fondamentaux de la relativité et de la théorie quantique, il doit y en avoir beaucoup qui l'éprouvent au début de leurs carrières. En effet, certains doutent de la validité de la mécanique quantique dès leurs études. Bien sûr, ils l'apprennent et savent aussi bien que tout autre l'utiliser pour leurs calculs. Mais ils ne parviennent pas à y croire. Que leur arrive-t-il donc ?

Ces personnes sont de deux sortes : les sincères et les non sincères. Je n'ai jamais pu croire à la mécanique quantique, mais je fais partie des non sincères. J'ai compris tôt dans mon parcours que je ne pourrais pas mener une carrière correcte en tant que physicien théoricien universitaire si je ne faisais qu'essayer de trouver un sens à la mécanique quantique. En conséquence, j'avais décidé de m'orienter vers quelque chose que les autres comprendraient et apprécieraient suffisamment pour me laisser poursuivre une carrière normale.

Heureusement, j'ai trouvé comment explorer mes doutes sur les origines en travaillant sur quelque chose d'aussi tendance que la gravité quantique. Puisque, avant tout, je ne croyais pas à la mécanique quantique, j'étais assez certain que cet effort était voué à l'échec, mais j'espérais que cet échec nous fournirait des indices sur ce qui pourrait remplacer la théorie quantique. Quelques années plus tôt, j'aurais eu autant de mal à poursuivre une carrière fondée sur la gravité quantique qu'en exposant mes inquiétudes sur la validité de la théorie quantique dans son ensemble. Toutefois, une voie facile s'ouvrit à moi pendant la thèse, consistant à étudier le problème de la gravité quantique avec des méthodes récentes, développées pour l'analyse du modèle standard. En conséquence, je pouvais prétendre être un physicien comme les autres, qui fait de la science normale, formé en tant que spécialiste de la physique des particules. J'ai ensuite appliqué ce que j'avais appris à la gravité quantique. Puisque j'étais parmi les premiers à essayer cette approche et puisque j'utilisais les instruments que les leaders de la tendance agréaient, cela a rendu possible une carrière correcte, à défaut d'être sidérale.

Mais je ne pus jamais réprimer totalement l'envie de sonder les fondements de ce sur quoi je travaillais. J'ai écrit un article en 1982 intitulé « Sur la relation entre les fluctuations quantiques et thermiques », qui, quand je le relis aujourd'hui, me paraît d'une audace incroyable[39]. J'ai posé une question inédite sur la manière dont l'espace, le temps et le monde quantique pouvait aller de pair – question qui ouvrit une nouvelle voie à l'examen de ce problème. Même aujourd'hui, après avoir écrit beaucoup d'articles d'influence, je pense que celui-là était mon meilleur. De temps en temps, je rencontre un étudiant en train de lire les textes fondamentaux de la discipline, ou un solitaire resté en province pendant quelques dizaines d'années, qui me dit : « Ah, vous êtes ce Smolin ! Je n'avais jamais fait le lien. Je pensais que vous étiez mort, ou que vous aviez abandonné la physique. » Et ce n'est qu'aujourd'hui, enfin, avec mes collègues de Perimeter, que je reviens à l'étude des fondements de la mécanique quantique.

Qu'en est-il des gens sincères, qui ne crurent jamais aux présupposés fondamentaux tels que la relativité et la théorie quantique et qui n'avaient pas un caractère suffisamment malléable pour réprimer ces inclinations ? Ils forment une race à part et ont, chacun, une histoire personnelle.

Julian Barbour est bien connu de ceux qui se tiennent au courant des nouveautés scientifiques en tant qu'auteur de *La Fin du temps*, livre où il énonce que le temps est une illusion[40]. C'est un physicien pas comme les autres, puisque, après avoir soutenu sa thèse de doctorat à Cologne en 1968, il n'occupa jamais de poste universitaire. Mais il a fortement influencé un petit groupe de gens qui réfléchissent sérieusement sur la gravité quantique, car c'est lui qui nous enseigna le sens exact de l'indépendance du fond.

Comme le raconte Barbour, lors d'une randonnée d'alpinisme alors qu'il écrivait sa thèse, il fut saisi par la vision que le temps pourrait être une illusion. Cette vision l'a poussé à explorer les racines de notre connaissance du temps, qui font partie de la théorie de la relativité générale. Il a compris qu'il ne pourrait pas avoir de carrière universitaire normale s'il voulait réfléchir à cette question, de même que, s'il devait travailler sur ce problème, il devrait alors s'y consacrer pleinement, sans être distrait par les pressions qu'impose le désir d'une carrière normale en physique. En conséquence, il acheta une vieille ferme dans un petit village à une demi-heure d'Oxford, y amena sa femme et se mit à réfléchir. Dix ans environ sont passés avant qu'il n'ait quelque chose à dire à ses collègues, dix ans durant lesquels il conçut avec sa femme quatre enfants tout en travaillant à temps partiel comme traducteur pour gagner sa vie. La traduction ne l'occupait pas plus de vingt heures par semaine, ce qui lui laissait autant de temps pour son propre travail qu'à ses collègues, les scientifiques universitaires, après qu'on leur a imputé le temps consacré à l'enseignement et à la gestion administrative.

Pour s'orienter dans le problème de la signification du temps, Barbour a entrepris une lecture détaillée de ce qui avait été publié sur ce sujet, tout en remontant dans l'histoire jusqu'aux racines de la physique et de la philosophie. Il inventa finalement une nouvelle théorie, dans laquelle l'espace et le temps ne sont que des systèmes de relations. Peu à peu, la communauté scientifique remarqua ses articles sur ce sujet, et, finalement, il est devenu un membre respecté de la communauté de la gravité quantique. Sa réinterprétation de la

théorie de la relativité générale d'Einstein comme une théorie relationnelle est désormais la façon même dont nous comprenons celle-ci, au sein de notre discipline.

Cela n'est pas, loin s'en faut, tout ce qu'a accompli Barbour, mais cela suffit pour montrer comment la carrière d'un visionnaire est différente de celle d'un scientifique académique ordinaire. Un tel personnage ne suit pas la mode ; en fait, il ne suit probablement même pas la recherche en cours d'assez près pour savoir en quoi consiste cette mode. De telles personnes ne sont motivées par rien d'autre que leur propre conviction, acquise tôt dans leurs vies, qu'il manque à tous les autres quelque chose d'essentiel. Leur approche est plus érudite car, pour penser avec clarté, ils ont besoin de lire tout ce qui a été écrit sur la question qui les obsède. Leur travail est très focalisé, et pourtant il leur faut beaucoup de temps pour parvenir à un résultat. Au moment où une carrière académique traditionnelle est déjà bien avancée, eux n'ont encore strictement rien produit. Lorsqu'il fut prêt, Julian Barbour a changé le cours de la science plus que la plupart des scientifiques universitaires, alors que, à l'âge où la majorité des physiciens occupent déjà des postes permanents, il n'avait strictement aucun résultat abouti à présenter.

La carrière de Barbour ressemble à celles d'autres visionnaires, comme Charles Darwin, qui s'est lui aussi retiré dans la province anglaise pour avoir le temps de réfléchir en profondeur sur ce qui l'obsédait. Einstein a passé dix ans à élaborer les prémisses de la relativité restreinte, puis dix ans encore pour la relativité générale. Le temps et la liberté de penser sont nécessaires au visionnaire pour identifier le présupposé non étudié. Pour le reste, il est autonome et se suffit à lui-même.

Citons également David Finkelstein, professeur émérite au Georgia Institute of Technology, qui a passé toute sa vie à chercher la logique de la nature. Il fait de la physique différemment, se donnant pour mission de comprendre, comme il me l'a dit lors de notre première rencontre, « comment Dieu a pu penser l'existence du monde ». Il n'a jamais fait autre chose et chaque fois que nous nous rencontrons, il a une nouvelle idée à ce sujet. Le long du chemin, il fit quelques digressions. Ainsi, il fut le premier à comprendre ce qu'est l'horizon d'un trou noir[41], le premier à découvrir les caractéristiques importantes de la physique des solides, appelés « lois topologiques de conservation », et le premier à étudier un grand nombre de structures mathématiques comme par exemple les groupes quantiques. Sa vie est le parfait exemple de la variété des contributions qu'un visionnaire apporte lorsqu'il poursuit son propre chemin vers la vérité. Bien que Finkelstein ait eu une carrière académique, quelqu'un comme lui – quelqu'un qui n'écoute que sa voix intérieure et ignore presque tout le reste – aurait-il pu obtenir aujourd'hui un poste de professeur dans une université de premier plan ? Pensez donc !

Voici une autre histoire dans le genre de celle de Barbour. Antony Valentini a commencé avec un diplôme de l'université de Cambridge, tout comme Barbour. Il erra en Europe pendant quelques années, puis s'installa à Trieste pour étudier avec Dennis Sciama, le professeur de Stephen Hawking, Roger Penrose, Martin Rees, George Ellis et quelques autres grands cosmologues et spécialistes de la relativité à Cambridge. Sciama fondit vers la fin de sa carrière à Trieste un groupe d'astrophysique à l'Institut italien, nouveau à l'époque, appelé SISSA (Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati). Valentini était l'un des

derniers étudiants de Sciama et n'a pas travaillé en astrophysique ; au contraire, il poursuivait un travail en théorie quantique, fondé sur le sentiment instinctif qu'elle n'avait aucun sens. Il a étudié une vieille idée, proposée à l'origine par Louis de Broglie dans les années 1920 et appelée « théorie des variables cachées », selon laquelle il existe une seule réalité cachée derrière les équations de la théorie quantique. L'idée des variables cachées fut réprimée pendant des dizaines d'années, malgré le soutien d'Einstein, de Schrödinger et d'autres – en partie à cause d'une preuve fallacieuse publiée par John von Neumann en 1937 selon laquelle de telles théories ne pouvaient exister. L'erreur de von Neumann fut découverte par le théoricien quantique David Bohm au début des années 1950, qui ranima par la suite la théorie de de Broglie. Valentini a apporté une modification nouvelle, très importante, à la théorie des variables cachées, la première amélioration depuis des décennies. La majorité de ses articles sur ce sujet furent rejetés par les revues de physique, mais leur contenu est maintenant largement accepté par les spécialistes travaillant sur les fondements de la mécanique quantique.

Sciama a fait tout ce qui était en son pouvoir pour encourager Valentini et l'aider, mais il n'y avait pas de poste académique disponible ni en Italie, ni dans le monde anglo-saxon, pour quelqu'un se consacrant aux problèmes des fondements. Sciama a suggéré que si Valentini ne pouvait pas publier son corpus grandissant de résultats dans les revues, il devait écrire un livre pour les exposer. Sans poste, Valentini partit donc à Rome où il obtint finalement un post-doc à l'université. Celui-ci ayant expiré, il est resté à Rome six ans de plus, amoureux de cette ville et de ses habitants, gagnant sa vie avec des cours particuliers, développant sa théorie et rassemblant ses résultats dans un livre[42].

Bien que beaucoup de physiciens de premier plan admettent en privé que le problème des fondements de la mécanique quantique existe, leur opinion en public consiste à dire que tous ces problèmes ont été résolus dans les années 1920. Un exposé académique du travail plus tardif sur les fondements n'existe tout simplement pas, mais je sais que depuis les années 1950 au moins, les revues principales n'ont publié d'articles sur ce sujet que de manière très sélective, quelques revues allant jusqu'à interdire explicitement la publication de ce genre de papiers. Les agences de financement et les fondations gouvernementales majeures n'ont généralement pas soutenu ce travail[43] et les départements des universités manifestent depuis une tendance à ne pas recruter les spécialistes des fondements de la mécanique quantique.

Cette opiniâtreté générale est en partie due au passage à la science normale, révolution scientifique qui prit place dans les années 1940. Comme dans le cas d'une révolution politique, elle devait réprimer l'opposition afin de consolider ses acquis. Au début existaient quelques points de vue et quelques idéologies concurrentes au sujet de l'interprétation de la mécanique quantique, mais dans les années 1940, une seule triompha. En référence au rôle central de Niels Bohr, on l'appela « interprétation de Copenhague ». Bohr et ses disciples avaient intérêt à couper court au débat, et je ne serais pas surpris qu'on découvre qu'ils utilisaient les instruments de la politique académique pour y parvenir ; étant donné leur participation à la construction des armes nucléaires, sans doute étaient-ils bien placés pour cela. Même ceux qui ne s'intéressaient pas à l'idéologie et ne voulaient que poursui-

vre leur recherche au sein de la science normale avaient une bonne raison d'étouffer le débat sur les fondements. La théorie quantique a été, sur les plans expérimental et pratique, une énorme réussite, et ceux qui voulaient avancer dans son élaboration n'ont pas souhaité être harcelés par les doutes tenaces de ceux qui s'inquiétaient encore qu'il restât des problèmes essentiels dans l'interprétation et la formulation de la théorie. C'était le moment d'avancer.

Ceux qui doutaient encore ne disposaient que de peu d'options. Certains se sont transformés en philosophes et ont publié de longs développements savants dans des revues de philosophie. Ces gens créèrent une petite sous-culture qui, au moins, garda le débat en vie. Ceux, peu nombreux, qui avaient des talents de mathématicien ont occupé des postes dans les départements de mathématiques, où ils publiaient leur travail formel et rigoureux sur les approches alternatives à l'interprétation consensuelle de la mécanique quantique. D'autres – parmi eux les meilleurs spécialistes du sujet – sont devenus professeurs dans de petits collèges éloignés, où on ne leur demandait pas de postuler pour des financements externes. Quelques autres encore ont poursuivi des carrières dans d'autres domaines de la physique et, de temps en temps, revenaient à leur travail sur la mécanique quantique comme à une espèce de passe-temps.

John Stewart Bell était l'un d'eux. Il découvrit un théorème clef de la théorie des variables cachées au début des années 1960 et bâtit sa carrière comme physicien des particules, mais aujourd'hui, quelques années après sa mort, il est clair que sa contribution la plus importante fut son travail en théorie quantique. On raconte parfois que Bell aurait dit qu'un chercheur devait faire de la science normale et ne passer que 10 % de son temps à s'inquiéter de questions de théorie quantique. Quand cette phrase surgit dans une conversation, mon collègue de Perimeter, Lucien Hardy, aime spéculer sur ce que Bell aurait apporté à la théorie quantique s'il avait passé plus de temps à travailler dans ce domaine, où il eut le plus d'impact ; sauf que dans ce cas, il n'aurait probablement jamais occupé de poste.

Il n'est pas étonnant que, durant toute cette période, très peu de progrès furent accomplis quant aux fondements de la mécanique quantique. Comment pouvait-il en être autrement ? Bien sûr, c'était souvent considéré comme une bonne raison de ne pas embaucher, ou ne pas financer, ou ne pas publier les quelques personnes qui avaient malgré tout fait progresser ces questions.

Nous savons maintenant que les sceptiques avaient tort. Il y a environ vingt ans, Richard Feynman et quelques autres chercheurs ont compris qu'on pouvait construire un type nouveau d'ordinateur qui donnerait la part belle aux phénomènes quantiques. Cette proposition est restée largement inexplorée, jusqu'à ce qu'une proposition, plus détaillée, voie le jour en 1985 sous la plume de David Deutsch, qui travaille maintenant au centre de computation quantique à Oxford[44]. Il n'existe pas de penseur plus intéressé par les fondements que Deutsch ; sa source de motivation pour inventer l'ordinateur quantique était d'ailleurs son inquiétude au sujet des problèmes des fondements, à la fois en mathématiques et en théorie quantique. On peut facilement s'apercevoir du degré d'innovation et de clarté de sa pensée en lisant son livre, provocateur, *L'Étoffe de la réalité*[45], dans lequel il

développe sa théorie des mondes multiples. Je ne suis pas du tout d'accord avec une grande partie de ce que dit ce livre, mais je l'ai beaucoup aimé.

En 1994, Peter Schor du MIT, à l'époque informaticien aux Laboratoires Bell, trouva un résultat remarquable : un ordinateur quantique suffisamment grand peut casser n'importe quel code cryptographique existant[46]. Depuis, l'argent a coulé à flot dans le champ de la computation quantique, aucun gouvernement ne voulant être le premier dont on pouvait casser les codes. Cet argent a soutenu une génération de scientifiques jeunes et très intelligents : des physiciens, des informaticiens et des mathématiciens. Ils ont créé un domaine nouveau mélangeant physique et informatique, dont une partie importante inclut un réexamen des fondements de la mécanique quantique. Tout à coup, la computation quantique est devenue un domaine « chaud », riche d'idées et de résultats nouveaux. Quelques-uns de ces résultats répondent aux inquiétudes concernant les fondements, pourtant beaucoup d'entre eux auraient pu être découverts n'importe quand depuis les années 1930. Voilà un exemple précis montrant comment la répression d'un champ de recherche par la politique académique peut ralentir le progrès durant des décennies entières.

En 1999, après sept ans de vie isolée à Rome, Antony Valentini a de nouveau emménagé dans la maison de ses parents à Londres, où sa famille avait immigré depuis un petit village des Abruzzes. Elle possédait un petit magasin et était prête à le soutenir dans son travail autant que nécessaire. C'est cette année-là que je l'ai rencontré, alors que j'étais professeur invité à Imperial College. Après en avoir discuté avec Christopher Isham, directeur du groupe théorique à Imperial, nous avons décidé de lui offrir un post-doc et de le ramener à la science. Nous le pouvions, car je venais de recevoir le soutien inattendu et généreux d'un mécène inquiet, lui aussi, des fondements de la mécanique quantique. J'ai considéré que de soutenir quelqu'un s'étant montré capable de contribuer à ce domaine par des résultats nouveaux et importants était un bon investissement. Si je n'avais été moi-même soutenu que par l'argent de la National Science Foundation, je n'aurais eu aucune chance de le faire. Quoique la NSF ait été bien généreuse à mon égard, partager le financement avec un post-doc travaillant sur les fondements de la théorie quantique aurait pu réduire les chances d'obtenir de nouveaux financements par la suite.

Maintenant, Valentini nous a rejoints à Perimeter. Il travaille toujours à son livre sur les variables cachées, mais, entre-temps, il est devenu un des leaders de la discipline des fondements de la théorie quantique ; il participe souvent en tant que conférencier invité à des colloques de premier plan. Aujourd'hui, il publie régulièrement et son travail le plus récent concerne une nouvelle proposition audacieuse pour tester la mécanique quantique par l'observation des rayons X qui proviennent des environs des trous noirs[47]. Comme pour Julian Barbour, les années de vie isolée lui ont permis de se former lui-même. Il n'y a pas de critique mieux informé et plus perspicace que lui dans le domaine de la théorie quantique.

Rappelez-vous les raisons pour lesquelles Barbour et Valentini ne pouvaient pas réussir en choisissant une carrière académique ordinaire. Alors que n'importe quel jeune chercheur aurait été à ce moment assistant ou maître de conférence, aurait travaillé dur et pu-

blié abondamment pour être reconnu et obtenir des invitations et des financements dans le but de décrocher un poste permanent, ces deux-là ne publiaient rien. Pourtant, tous deux étaient sur la voie de résultats importants. Ils réfléchissaient, de manière plus concentrée et approfondie que ne pourrait le faire un maître de conférences, chacun sur un seul problème récalcitrant touchant les fondements. Quand ils sont revenus dans la communauté, environ dix ans plus tard, chacun possédait un point de vue original, bien pensé et mature, qui leur a vite permis d'acquérir une influence certaine. L'autorité gagnée par des années d'étude et de réflexion, et par le fait d'en être sorti avec un résultat nouveau et important, les a transformés en interlocuteurs essentiels pour tous ceux qui s'inquiétaient aussi de ces questions.

Pour les visionnaires, le besoin de rester seul pendant une période de temps prolongée, au début de leur carrière et souvent plus tard, est une composante essentielle du travail. Alexandre Grothendieck est souvent cité comme le mathématicien visionnaire vivant le plus important. Il a suivi une carrière particulièrement peu conventionnelle. Quelques-unes parmi ses contributions majeures, qui ont fait école, n'ont pas été publiées. Elles furent envoyées par la poste – des lettres de centaines de pages qu'il écrivait à ses amis et qui passèrent ensuite de la main à la main à l'intérieur d'un petit cercle de gens capables de les lire. Ses parents avaient fui l'oppression politique et la guerre ; il a grandi dans des camps des réfugiés après la Seconde Guerre mondiale. Dans le monde mathématique parisien, il surgit comme venant de nulle part. Suivant une carrière brève, mais d'influence extraordinaire, il s'est retiré de la vie scientifique dans les années 1970, en partie parce qu'il voulait protester contre le financement des mathématiques par les militaires. Il a entièrement disparu en 1991 et, bien qu'il existe des rumeurs suggérant qu'il vit en ermite dans les Pyrénées, on ne sait toujours pas où il se trouve exactement. Évidemment, l'histoire de Grothendieck est un cas extrême. Mais vous devriez voir de vos yeux l'expression d'admiration, d'émerveillement et peut-être même de peur sur les visages de quelques très bons mathématiciens quand on prononce son nom. Voici comment il décrit certaines de ses expériences :

> Pour le dire autrement : j'ai appris, en ces années cruciales, à *être seul*. (Cette formulation est quelque peu impropre. Je n'ai jamais eu à « apprendre à être seul », pour la simple raison que je n'ai jamais *désappris*, au cours de mon enfance, cette capacité innée qui était en moi à ma naissance, comme elle est en chacun. Mais ces trois ans de travail solitaire, où j'ai pu donner ma mesure à moi-même, suivant les critères d'exigence spontanée qui étaient les miens, ont confirmé et reposé en moi, dans ma relation cette fois au travail mathématique, une assise de confiance et de tranquille assurance, qui ne devait rien aux consensus et aux modes qui font loi.) J'entends par là : aborder par mes propres lumières les choses que je veux connaître, plutôt que de me fier aux idées et aux consensus, exprimés ou tacites, qui me viendraient d'un groupe plus ou le moins étendu dont je me sentirais un membre, ou qui pour toute autre raison serait investi pour moi d'autorité. Des consensus muets m'avaient dit, au lycée comme à l'université, qu'il n'y avait pas lieu de se poser de question sur la notion même de « volume », présentée comme « bien connue », « évidente », « sans problème ». J'avais passé outre, comme chose allant de soi [...]. C'est dans [...] cet acte de « *passer outre* », d'être soi-même en somme et non pas simplement l'expression des consensus qui font loi, de ne pas rester

> enfermé à l'intérieur du cercle impératif qu'ils nous fixent – c'est avant tout dans cet acte solitaire que se trouve « *la création* ». Tout le reste vient par surcroît.
>
> Par la suite, j'ai eu l'occasion, dans ce monde des mathématiciens qui m'accueillait, de rencontrer bien des gens, aussi bien des aînés que des jeunes gens plus ou moins de mon âge, qui visiblement étaient beaucoup plus brillants, beaucoup plus « doués » que moi. Je les admirais pour la facilité avec laquelle ils apprenaient, comme en se jouant, des notions nouvelles, et jonglaient avec comme s'ils les connaissaient depuis le berceau – alors que je me sentais lourd et pataud, me frayant un chemin péniblement, comme une taupe, à travers une montagne informe de choses qu'il était important (m'assurait-on) que j'apprenne, et dont je me sentais incapable de saisir les tenants et les aboutissants. En fait, je n'avais rien de l'étudiant brillant, passant haut la main les concours prestigieux, assimilant en un tournemain des programmes prohibitifs.
>
> La plupart de mes camarades plus brillants sont d'ailleurs devenus des mathématiciens compétents et réputés. Pourtant, avec le recul de trente ou trente-cinq ans, je vois qu'ils n'ont pas laissé sur la mathématique de notre temps une empreinte vraiment profonde. Ils ont fait des choses, des belles choses parfois, dans un contexte déjà tout fait, auquel ils n'auraient pas songé à toucher. Ils sont restés prisonniers sans le savoir de ces cercles invisibles et impérieux, qui délimitent un Univers dans un milieu et à une époque donnée. Pour les franchir, il aurait fallu qu'ils retrouvent en eux cette capacité qui était leur à leur naissance, tout comme elle était mienne : la capacité d'être seule[48].

C'est un cliché de demander si le jeune Einstein pourrait être aujourd'hui recruté par une université. La réponse est évidemment non ; il n'a pas été embauché même de son temps. Aujourd'hui, tout le monde est beaucoup plus professionnalisé, et les recrutements se font par concours formalisés parmi des candidats extrêmement entraînés aux habiletés techniques. Mais certains de ceux que j'ai nommés ci-dessus ne pourraient pas non plus être recrutés. Si nous connaissons les contributions de ces scientifiques, ce n'est que grâce à leur générosité – ou peut-être à leur obstination à poursuivre le travail sans avoir le soutien que le monde académique réserve normalement aux scientifiques.

Au premier abord, le problème peut sembler simple à corriger. De telles personnes sont peu nombreuses et faciles à reconnaître. Peu de scientifiques réfléchissent sur les questions des fondements et encore moins ont des idées nouvelles à ce sujet. Mon ami Stuart Kauffman, directeur de l'Institut de biocomplexité et d'informatique à l'université de Calgary, m'a dit une fois que ce n'était pas difficile de sélectionner les gens capables d'engendrer des idées audacieuses, car ils sont presque toujours déjà prêts à vous en exposer quelques-unes. S'ils n'en ont aucune à la fin de leur thèse ou quelques années après, il est probable qu'ils n'en auront plus jamais. Par conséquent, comment distingue-t-on les visionnaires qui ont des bonnes idées des autres qui tentent leur chance, mais qui n'y arrivent simplement pas ? C'est également facile. Posez la question aux visionnaires plus âgés. À Perimeter, nous n'avons aucune difficulté à choisir ces quelques jeunes qui méritent d'être suivis.

Mais une fois ces personnes identifiées, on doit les traiter différemment de celles qui font de la science normale. La plupart d'entre eux ne veulent pas savoir qui est le plus intelligent ou le plus rapide à résoudre les problèmes posés par le courant dominant. Même

s'ils avaient essayé de concourir, étant donné la violence de cette compétition, ils auraient perdu. S'ils sont en réalité en compétition avec quelqu'un, c'est avec la dernière génération des révolutionnaires, qui leur parlent à partir des pages de livres anciens ou d'articles que personne ne lit. Peu de forces extérieures sont capables de les émouvoir ; leur attention est focalisée sur les inconsistances de la science et les problèmes que la majorité des scientifiques préfèrent ignorer. Si l'on attend cinq ans ou même dix, ils ne changeront pas d'allure juste pour devenir comme tout le monde. Il ne faut pas paniquer, mais seulement les laisser tranquilles. Éventuellement, comme dans les cas de Barbour ou de Valentini, ils réapparaîtront avec quelque chose qui vaudra la peine d'avoir attendu.

Puisqu'il existe peu de personnes de ce type, il ne doit pas être spécialement difficile de leur trouver une place au sein du monde universitaire et académique. En effet, on pourrait croire que beaucoup d'instituts, de collèges et d'universités seraient heureux de les accueillir. Puisqu'ils réfléchissent de façon si claire aux fondements de leurs disciplines, ils sont souvent, en même temps, de très bons enseignants, charismatiques même. Rien n'inspire plus un étudiant qu'un visionnaire lui-même inspiré. Puisqu'ils ne sont pas compétitifs, ils sont aussi de bons tuteurs et directeurs de thèses. Après tout, n'est-il pas vrai que le travail principal des universités et des collèges est d'éduquer ?

Ceci représente bien sûr un risque véritable. Certains parmi eux ne découvriront rien. Je parle ici de contribution scientifique à l'échelle d'une vie. Mais la plupart des scientifiques académiques, même s'ils réussissent en termes de carrière, obtiennent des financements, publient beaucoup d'articles et participent aux colloques, ne contribuent à la science que de façon marginale. La moitié au moins de nos collègues en physique théorique ne parviendront pas à produire une contribution unique ou qui survivra pendant un certain temps. Une bonne carrière et une carrière essentielle ne sont pas la même chose, et même si ces chercheurs académiques ne s'étaient pas consacrés à la science, celle-ci aurait probablement suivi à peu près le même chemin. Par conséquent, le risque est là, dans les deux cas.

La nature et le coût des différents types de risque sont ce genre de questions que les hommes d'affaires comprennent mieux que les administrateurs universitaires. Il est beaucoup plus facile d'avoir une conversation utile et honnête sur ce sujet avec un homme d'affaire plutôt qu'avec un chercheur académique. J'ai, une fois, demandé à un investisseur qui a réussi en capital-risque comment sa société décidait quel niveau de risque elle devait prendre. Il m'a répondu que, si plus de 10 % des sociétés qu'il finançait gagnaient de l'argent, alors il savait qu'il ne prenait pas assez de risque. Ce que ces gens comprennent, et ils vivent avec, c'est que vous avez globalement un rendement maximal qui correspond au taux maximal du progrès technique lorsque 90 % des sociétés que vous financez échouent.

Si seulement je pouvais avoir une conversation honnête sur le risque avec la National Science Foundation ! Je suis sûr que 90 % des financements qu'ils distribuent dans mon domaine échouent, si on mesure leur succès à l'aune de la vraie norme : le financement mène-t-il à un progrès en science qui n'aurait pas eu lieu si la personne financée ne travaillait pas dans ce domaine ?

Comme le sait chaque homme d'affaire qui a du succès, il existe une différence certaine entre les stratégies à risque bas et à rendement bas, et les stratégies à risque élevé et à rendement élevé, à commencer par le fait que ces deux stratégies ont été conçues pour atteindre des fins différentes. Quand vous dirigez une compagnie aérienne ou une société de transport en bus, comme quand vous fabriquez du savon, vous optez pour la première. Quand vous voulez développer des technologies nouvelles, vous ne réussirez jamais si vous ne choisissez pas la seconde.

J'aurais tout donné pour que les administrateurs universitaires se mettent à penser en ces termes. Ils établissent les critères pour le recrutement, la promotion et la distribution des postes permanents comme s'il n'existait que des scientifiques normaux. Rien ne peut être plus facile que de modifier un peu ces critères pour reconnaître qu'il existe différents types de scientifiques, des talents différents. Désirez-vous une révolution scientifique ? Alors faites ce que font les hommes d'affaires quand ils désirent une révolution technologique : modifiez un peu les règles. Laissez entrer quelques révolutionnaires. Aplatissez un peu la structure hiérarchique pour donner aux jeunes plus de souplesse et plus de liberté. Créez quelques occasions pour les chercheurs à risque et à rendement élevés, de sorte que cela serve d'équilibre aux grands investissements que vous faites déjà dans la stratégie incrémentale, à risque bas. Pourquoi ne pas essayer ça dans les universités, dans le monde académique ? Le rendement pourrait bien en être la découverte de la façon de fonctionner de tout l'Univers.

19
Comment fonctionne la science en réalité

L'idée de modifier la façon dont la science est pratiquée dans les universités plaira sans doute à certains, mais en horrifiera d'autres. Cela ne risque pourtant pas de se produire. Pour comprendre pourquoi, il faut inspecter les côtés sombres, les faces cachées de la vie académique. Comme le disent les sociologues, ce n'est pas seulement une question de sagesse, mais aussi de pouvoir : qui le possède et comment il est utilisé.

Il existe quelques caractéristiques des universités et des centres de recherche qui découragent tout changement. La première, c'est le système des comités de lecture et d'évaluation, où les décisions sur l'avenir de tels ou tels scientifiques sont prises par d'autres scientifiques. Tout comme le système d'attribution des postes permanents, celui des comités de lecture a des avantages qui expliquent pourquoi tout le monde croit que ce système est essentiel pour une bonne pratique de la science. Mais il entraîne en même temps des coûts, et il faut en être conscient.

Je suis sûr qu'une personne ordinaire n'a pas la moindre idée du temps que les universitaires passent à prendre des décisions sur le recrutement d'autres universitaires. Moi-même, je consacre à peu près cinq heures par semaine à siéger dans des comités où l'on discute des carrières des autres, ou à écrire des lettres qui seront lues par ces comités. Voici un certain temps que ma vie s'organise de cette manière. C'est une partie importante du travail de tout professeur et beaucoup y passent plus de temps que moi. Une chose est sûre : à part si vous sapez votre réputation en vous montrant explicitement irresponsable, imprévisible ou indigne de confiance, plus longtemps vous serez dans la carrière scientifique, plus de temps vous passerez à vous mêler des carrières d'autres scientifiques. Pas seulement parce qu'avec le temps vous aurez de plus en plus d'étudiants, de post-docs et de collaborateurs qui auront besoin que vous écriviez des lettres pour eux, mais parce que vous ferez également partie du système de recrutement d'autres universités et instituts de recherche.

Quelqu'un dans l'administration s'est-il jamais posé la question du temps que tout ceci prend ? Est-ce vraiment indispensable ? Serait-il possible de passer moins de temps au recrutement et plus de temps à la recherche et à l'enseignement ? Je n'ai pu moi-même tâter que d'un petit bout du système ; celui-ci est déjà bien effrayant. Aucun département uni-

versitaire, ni institut avec des aspirations élevées, ne décide de ses embauches sans consulter tout un réseau de comités *ad hoc* et permanents, où siègent des scientifiques âgés et respectés appartenant aux autres institutions. Il existe aussi des comités auprès des agences de financement aux États-Unis, au Canada, en Europe et partout dans le monde. Puis, il y a tous les contacts informels, les coups de téléphones et les conversations privées, où l'on vous demande d'évaluer franchement et sous couvert de confidentialité des listes des candidats. Passé un certain point, un scientifique confirmé peut facilement passer tout son temps à ne faire que de la politique de recrutement.

Cela s'appelle le *peer review*[*] en anglais. C'est un drôle de nom, puisqu'il se distingue nettement de la notion de jury de pairs, suggérant que vous serez jugé par des gens vous ressemblant supposés équitables et objectifs. Dans le monde extérieur, pour les juges réels qui cachent consciemment un biais de procédure, la punition est la prison.

Dans le monde académique, à quelques exceptions près, les gens qui vous évaluent sont plus vieux que vous et aussi plus puissants. Cet état de choses persiste tout au long de la carrière, depuis le premier cours de première année d'université jusqu'aux dossiers que vous envoyez pour demander le financement du laboratoire dont vous êtes le directeur. Je ne veux pas dénigrer le travail difficile que font les nombreux ouvriers des usines des comités de lecture. La plupart d'entre eux le font honnêtement. Mais il existe aussi des problèmes importants avec cette procédure, et ces problèmes sont en rapport avec l'état actuel de la physique.

Un dérivé inattendu du système des comités de lecture est qu'il peut facilement devenir un outil pour permettre à des scientifiques âgés de contraindre des collègues plus jeunes à suivre telle direction de recherche particulière. C'est si évident que je m'étonne de la rareté des discussions à ce sujet. Le système est conçu de telle façon que nous, les vieux, pouvons récompenser ceux qui nous plaisent en leur offrant de bonnes carrières, et punir ceux qui nous déplaisent en les bannissant de la communauté scientifique. Cela pourrait bien marcher si nous avions des critères clairs et une méthodologie non ambiguë pour garantir l'objectivité du choix, mais pour ce qui concerne au moins la partie de la communauté scientifique à laquelle j'appartiens, ni de tels critères, ni une telle méthodologie n'existent.

Comme je l'ai déjà dit et commenté en détail, il y a des types différents de scientifiques qui contribuent à la physique théorique, et ils ont tous des faiblesses et des avantages différents. Pourtant, on ne reconnaît qu'à peine ce fait évident ; au contraire, on a tendance à ne qualifier les gens que par « bien » ou « pas bien ». Le système des comités est fondé sur le présupposé simpliste et évidemment erroné que l'on peut classer les scientifiques sur une échelle unidimensionnelle, comme si on les mettait sur les marches d'un escalier.

Quand j'ai lu mon premier paquet de lettres de recommandation, en tant que tout nouveau professeur assistant à Yale en 1984, je n'y croyais simplement pas. Il va de soi qu'une lettre bien écrite peut communiquer beaucoup d'informations et même essayer d'ajouter quelques traits particuliers et quelques nuances. Malgré cela, tout le soin des auteurs était donné aux paragraphes à la fin des lettres, où ils offraient un classement relatif des candi-

[*] Examen par les pairs (NdE).

dats du genre : « X est mieux que A, B et C, mais aussi bien que E, F, G et H ». J'avais maintenant lu des milliers de lettres de recommandation dans ma vie, dont au moins la moitié contenait telle ou telle autre version de ce classement. Au début, il m'est arrivé de me trouver moi-même dans le rôle des personnages A, B et C. Je me rappelle avoir été d'accord pour dire que le candidat X était meilleur que moi – en effet, certains de ces X se sont débrouillés beaucoup mieux que moi par la suite. Mais je ne serais pas surpris qu'un travail de recherche démontre un jour que ces classements, en moyenne, prédisent très mal lequel des candidats aura un succès véritable en tant que scientifique. Si l'on désire réellement recruter les meilleurs, il faut faire cette recherche. Sans doute existe-t-il plus d'un cas de post-doc ou de maître de conférence classé premier dans son concours de recrutement qui n'a finalement rien accompli de notable et ne parvint jamais à obtenir un poste permanent.

Ce que cette pratique rend encore plus problématique est qu'on ne sanctionne pas la partialité. Un professeur éhonté écrira des lettres favorisant ses propres étudiants, ou les gens qui poursuivent son propre programme de recherche, ou même des gens ayant la même nationalité que lui. On note parfois des cas plus caricaturaux encore (et on s'amuse à les raconter aux autres), mais personne ne les considère comme une anomalie. C'est une partie intégrante du système.

Voici une règle de base pour prédire quel genre de jeunes chercheurs un scientifique confirmé voudra recommander : le jeune en question lui rappelle-t-il sa propre jeunesse ? Si en X vous voyez une version plus jeune de vous-même, alors X doit être vraiment très bien. Je sais que je suis aussi coupable de ce biais et je l'admets de bonne foi. Si vous voulez recruter plus de gens qui me ressemblent, dites-le moi : je suis parfait pour les sélectionner. Si vous cherchez à faire des distinctions fines parmi des gens qui ne me ressemblent pas, qui sont compétents pour faire des choses que je ne fais pas bien ou pour lesquelles je n'ai pas de respect, alors n'ayez pas confiance en mon jugement[49].

Même pour ceux d'entre nous qui essayons d'être équitables, il n'existe aucune formation, aucun conseil pour être objectif. On ne m'a jamais donné de conseil sur la façon d'écrire ou d'interpréter les lettres de recommandation ; je n'ai pas non plus vu de formation proposée pour savoir reconnaître le signal d'un préjugé ou d'un stéréotype dans nos propres opinions ou dans celles des autres. J'ai servi dans plusieurs comités de recrutement et de promotion, mais on ne m'a jamais formé, comme on forme les jurés, sur la meilleure manière d'évaluer les preuves.

Lors d'un dîner, j'ai demandé à des personnes appartenant à des métiers différents s'ils avaient reçu une telle formation. Tous ceux qui ne sont pas dans le domaine de la science mais qui ont une responsabilité dans le recrutement ou l'encadrement avaient reçu au moins quelques jours de formation pour apprendre à reconnaître les signes d'injustice ou de préjugés, à ne pas tenir compte des effets de hiérarchie et à encourager la diversité et l'indépendance de leur pensée. Ils savaient tout à propos du « prêter attention à tous les points de vue au sein de votre organisation » et du « faire un tour complet de la vie des candidats au recrutement ». Ils appliquaient ces règles en demandant des évaluations aux personnes précédemment encadrées par les candidats, ou qui les avaient dirigés eux-

mêmes. Si l'on suppose que les avocats, les banquiers, les producteurs de télévision et les éditeurs de journaux ont besoin d'être formés à la meilleure manière de prendre des décisions sages et équitables en matière de recrutement, pourquoi croit-on que nous, scientifiques universitaires, la connaissons automatiquement ?

Les choses sont pires que cela encore, car derrière les lettres de recommandation formelles se trouve un réseau de conversations confidentielles, informelles, avec les experts : « Que pensez-vous de celui-ci ou de celui-là ? Selon vous, qui faudrait-il recruter ? »

Ces conversations sont franches. On ne prend pas de gants. Ce n'est pas si mal. Beaucoup de gens essayent d'être à la hauteur et font de leur mieux pour être utiles, mais il est choquant de constater le faible niveau d'objectivité. De plus, il n'y a là aucun prix à payer pour avoir triché en faveur de vos amis et de leurs élèves. Il arrive fréquemment qu'un expert établi pousse en avant ses propres étudiants et post-docs, tout en les félicitant plus que les autres, en particulier beaucoup plus que les élèves de ses rivaux.

Même au cours de ces francs échanges, on n'entend que rarement des commentaires négatifs. Si les gens ne trouvent rien de positif, ils diront quelque chose comme : « Passons, je n'ai rien à dire », ou quelque chose de gentil comme : « Celle-ci ne me fascine pas. » Mais, à d'autres moments, le simple fait de prononcer le nom de quelqu'un peut susciter un : « Absolument pas ! » ou un : « N'y pensez même pas » ou encore : « Vous rigolez ? » sans parler du très définitif : « Il faudra me passer sur le corps ! » À chaque fois que cela m'est arrivé personnellement, un des trois éléments suivants était intervenu : soit le candidat était une femme, soit il n'était pas blanc, soit il était en train de créer son propre programme de recherche au lieu de suivre le courant dominant. Certes, il existe aussi des femmes et des Noirs dont les candidatures ne soulèvent aucune objection. Mais – encore une fois, selon ma propre expérience –, ce sont des cas où le candidat était taillé juste pour le programme de recherche établi et poursuivi.

Il existe un débat animé entre les physiciens sur la raison pour laquelle, en physique, il y a moins de femmes et de Noirs que dans les domaines à difficultés comparables, comme les mathématiques ou l'astronomie. Je crois que la réponse est simple : il s'agit de préjugés flagrants. Tous ceux qui, comme moi, ont servi pendant des décennies dans les comités de recrutement et qui disent ne pas avoir vu comment se manifestent les préjugés évidents sont soit aveugles soit malhonnêtes. Les règles en vigueur et l'éthique de confidentialité m'empêchent de citer ici des exemples, mais il existe néanmoins quelques études détaillées qui en révèlent un certain nombre[50].

Peut-être faut-il simplement s'attendre à ce que, dans ce domaine, les préjugés soient féroces. Combien de physiciens théoriciens de premier plan, jadis des garçons fragiles, petits et boutonneux, se vengèrent des beaux gosses (qui avaient toutes les filles) de la seule façon qui s'offrait à eux : lors d'un cours de maths ? J'en ai aussi fait partie, jusqu'à ce que j'apprenne ce que les beaux gosses savaient déjà : tout ceci n'est qu'une question de confiance en soi. Mais je me rappelle toujours m'être senti supérieur de ma performance en algèbre, et je peux vous dire franchement qu'au moins en ce qui me concerne, l'identification du talent mathématique avec la virilité est très profonde. Mais si c'est vrai, pourquoi les femmes ont-elles moins de difficultés à être embauchées en tant que mathé-

maticiennes pures que physiciennes ? Parce qu'en mathématiques, il est plus facile de reconnaître que vous avez fait quelque chose de bien. Un théorème est démontré ou non démontré. Le genre de jugement utilisé pour classer les physiciens est beaucoup moins net, ce qui laisse plus de place aux préjugés. Ainsi, ce n'est pas toujours facile de distinguer un bon théoricien de celui qui a seulement de l'assurance. Remarquons d'ailleurs que, bien qu'il y ait toujours eu des musiciennes de talent, le nombre de femmes recrutées par les orchestres a beaucoup augmenté depuis qu'on a commencé à auditionner les candidat(e)s derrière un écran.

C'est pourquoi la discrimination positive existe aux États-Unis. Au cours de ma vie, je n'ai jamais rencontré une femme ou un Afro-Américain recruté grâce à un programme de discrimination positive et qui ne le méritait pas mille fois – donc qui n'était pas déjà, de toute vraisemblance, le (la) meilleur(e) candidat(e). Quand les comités de recrutement ne seront plus composés exclusivement d'hommes blancs et qu'on n'y entendra plus de préjugés évidents, alors on pourra abandonner la discrimination positive. Aujourd'hui, les gens différents qui, pour une raison ou pour une autre, mettent mal à l'aise les physiciens blancs, âgés et puissants, ne sont pas embauchés. Il existe une discrimination positive pour les gens dont la différence est visible : les femmes et les Noirs. Qu'en est-il des gens qui *pensent* différemment, ceux qui rejettent la tendance pour poursuivre leurs propres idées ? Doit-il y avoir une discrimination positive pour eux aussi ?

Beaucoup d'entre nous participent au système des comités de lecture avec les meilleures intentions, celles de faire un choix objectif et moral. D'ailleurs, quand tout le reste est égal, c'est le meilleur candidat qui est sélectionné. Quand il ne reste que des candidats de sexe masculin, blancs du même âge avec les mêmes parcours qui poursuivent tous le même programme de recherche – le système sélectionne normalement le plus intelligent et le plus travailleur. Le problème est l'élagage nécessaire pour parvenir au point où tout est égal. Tout au long du chemin vers ce point, la procédure relève de la politique. C'est le mécanisme principal par lequel les scientifiques âgés et puissants exercent leur pouvoir sur les jeunes.

Cela résulte d'un processus de consensus forcé, dont les scientifiques âgés se servent pour s'assurer que les jeunes suivront leurs pas. Il y a quelques façons évidentes d'exercer ce pouvoir. Par exemple, un candidat à un poste universitaire a besoin de lettres d'un grand nombre de personnes, toutes plus puissantes que ce candidat. S'il y a une lettre un peu mitigée, cela suffira à réduire les chances du candidat à zéro. Quand je me suis aperçu pour la première fois de cette situation incroyable et de la pléthore de lettres de recommandation, j'en fus étonné. On peut sans aucun doute se former une bonne opinion d'un candidat avec trois ou quatre lettres. Pourquoi donc dix ou quinze, nombres souvent exigés par les universités les plus prestigieuses ?

Une des raisons est qu'il ne s'agit pas seulement de recruter de bons scientifiques. Les comités d'évaluation, les directeurs des départements et les présidents d'universités ont souvent un autre but en tête, accroître (ou au moins laisser intact) le statut du département. J'entends par là quelque chose de mesurable, plus mesurable que la promesse d'un jeune candidat en tout cas, car les mesures du statut se présentent sous forme de scores

dans un classement établi par les évaluateurs externes, au moyen de leurs propres impressions et de chiffres tels que le financement total acquis par le département, ou le nombre de citations. Les directeurs des départements s'inquiètent de ces scores puisque la position dans le classement a des répercussions financières brutales sur leurs propres carrières en tant qu'administrateurs. En premier lieu, il sera donc important de recruter ceux qui ont des chances d'apporter un financement généreux. Cela va clairement en faveur des membres de grands programmes de recherche bien établis plutôt que d'initiateurs de programmes nouveaux. En exigeant un grand nombre de lettres de recommandation, vous pouvez mesurer la perception actuelle par les scientifiques seniors du candidat dans son domaine. Par conséquent, le but n'est pas de recruter le plus susceptible de faire de la bonne science, mais celui qui permettra d'optimiser à court terme le statut du département. C'est pourquoi les comités de recrutement ne se tourmentent pas trop à propos des questions de long terme, comme de savoir quel candidat a le plus de chances de former une idée originale qui restera importante d'ici vingt ans. Au contraire, ils veulent savoir que dix ou quinze scientifiques confirmés perçoivent le candidat comme ayant déjà un rang élevé au sein de la communauté.

Pour arracher un si grand nombre de lettres de recommandation, vous ne pouvez être autre chose qu'un membre d'un vaste programme de recherche. Si vous êtes dans un petit projet, avec moins de dix personnes confirmées habilitées à vous juger, vous n'aurez qu'à demander des évaluations à des gens qui ne sont pas d'accord avec ce que vous faites, ou dont les projets sont en compétition avec le vôtre. En conséquence, on ne peut être tranquille qu'avec la majorité. Il n'est pas surprenant que les grands programmes de recherche dominent la scène.

Aucun doute ne subsiste sur le fait que la théorie des cordes a su tirer de ce système de grands bénéfices, ce qui rend plus difficile les efforts de qui veut poursuivre des programmes de recherche alternatifs. Comme lu dans un article récent du *New York Times*, « [les] scientifiques doivent encore élaborer plus que les détails de ce qu'ils croient être la théorie ultime et complète. Néanmoins, les théoriciens des cordes ramassent déjà le butin qui n'appartient normalement qu'aux vainqueurs expérimentateurs, y compris le financement fédéral, les récompenses prestigieuses et les postes permanents dans les universités ». On cite dans le même article David Gross, actuellement directeur de l'Institut Kavli de physique théorique à l'université de Californie à Santa Barbara, qui dit ceci : « Aujourd'hui, si tu es costaud, jeune et que tu travailles en théorie des cordes, on te garantit un *package* avec tout ce qu'il te faut pour le reste de ta vie[51]. »

Je ne critique pas ici la théorie des cordes ; après tout, les théoriciens des cordes ne font que se comporter comme le feraient les membres de tout programme de recherche dominant. Le problème est que nous avons un système de prise de décision dans le milieu universitaire et académique qui est beaucoup trop vulnérable à la prise de contrôle par un programme de recherche possédant une stratégie agressive de marketing, quels que soient ses résultats. Autrefois, le même système a marché *contre* les théoriciens des cordes. Comme l'écrit le journaliste Gary Taubes :

> Le 4 août 1985, j'étais à la cantine du CERN en train de boire une bière avec Alvaro de Rujula... De Rujula a prédit que 90 % des théoriciens travailleront bientôt sur les supercordes et le lien avec la supersymétrie, parce que c'était à la mode. Quand il m'a fait savoir que, selon lui, ce n'était pas sain, je lui ai demandé sur quel sujet il aurait préféré travailler. Au lieu de répondre à ma question, il s'en est écarté. « Il faut se rappeler, a-t-il dit, que les deux personnes qui ont le plus de responsabilités dans le développement des supercordes, à savoir Green et Schwarz, ont passé entre dix et quinze ans à travailler d'arrache-pied sur quelque chose qui n'était pas à la mode. On s'est même moqué d'eux et de leur obstination. Donc, quand on essaye de vous convaincre de travailler sur le sujet le plus en vogue, il faut que vous vous souveniez que les grands pas en avant sont toujours faits par ceux qui ne travaillent pas sur le sujet tendance[52]. »

J'ai, une fois, discuté de cet état de chose avec un directeur de département d'une université majeure, qui s'est lamenté sur son échec à convaincre ses collègues de recruter John Schwarz au début des années 1980 : « Ils étaient tous d'accord pour dire que Schwarz était un théoricien d'intelligence supérieure, mais je n'arrivais pas à les persuader, car ils disaient qu'il était trop obstiné et ne travaillerait probablement jamais sur autre chose que la théorie des cordes. Aujourd'hui, je n'arrive pas à convaincre mes collègues de recruter quelqu'un qui *n'est pas* théoricien des cordes. »

Je me rappelle aussi une discussion sur ces problèmes avec Abraham Pais, physicien des particules et biographe de Bohr et d'Einstein à la fois. Nous nous voyions parfois pour déjeuner à l'université Rockfeller de New York, où il était professeur et où j'avais un bureau. « Tu n'y peux rien », me disait Pais. « De mon temps aussi, ils étaient tous salauds ! »

Je crois que Pais n'avait pas compris l'essentiel. Ce n'est pas une histoire de personnes. C'est de la structure de prise de décision dans le milieu scientifique elle-même dont il s'agit. L'essentiel, c'est de garantir que les scientifiques dont on a réellement besoin pour faire progresser la science pourront le faire.

Ce système entraîne une autre conséquence importante qui précipite une crise de la physique : on préfère les gens possédant des capacités techniques impressionnantes mais pas d'idées, plutôt que les gens avec des idées originales, parce que, simplement, il n'existe aucune façon de classer des jeunes qui pensent par eux-mêmes. Le système est construit non seulement pour la science normale, *mais pour assurer que la science normale est ce que l'on fera*. J'ai compris ce point quand j'ai postulé pour mon premier emploi après ma thèse. Un jour que nous étudiions les résultats de nos demandes, un ami est venu me voir, l'air très inquiet. Un collègue senior l'avait chargé de me dire que je n'avais aucune chance de décrocher un emploi, car il était impossible de me comparer aux autres. Si je voulais poursuivre une carrière, il aurait fallu que j'arrête de travailler sur mes propres idées et que je fasse ce que font les autres, car c'était la condition nécessaire pour me comparer à mes pairs.

Je ne me rappelle plus ce que j'en ai pensé, ni pourquoi cela ne m'a pas rendu fou d'inquiétude pour la suite de ma carrière. J'ai dû attendre deux mois de plus que tous mes camarades pour avoir ma première offre de poste, ce qui n'était pas très drôle. Je commençais déjà à me demander comment gagner ma vie autrement, grâce à une activité quelconque qui me laisserait toutefois du temps pour la recherche. Mais j'ai eu de la chance.

L'institut de physique théorique de Santa Barbara venait d'ouvrir, et il avait un programme en gravité quantique. Ainsi, ma carrière ne s'est pas terminée avant même de commencer.

Je ne comprends que maintenant ce qui se passait réellement. Personne n'a consciemment agi de façon immorale. Mon ami et son mentor ne poursuivaient que mon propre intérêt, ou ce qu'ils considéraient tel. Voici comment la même situation serait décrite par un sociologue : un collègue aîné, le mentor, a inventé un nouveau programme de recherche impliquant la résolution de tâches techniques difficiles. Dans ce programme, on avait donc besoin de théoriciens jeunes, intelligents et rapides. On me disait, dans ce message, que si je travaillais sur son programme, il m'offrirait une carrière aboutie. C'est le marchandage le plus simple et le plus ancien : on donne à un ouvrier la vie en échange de son travail.

On peut présenter de bien des façons ce marchandage où ceux qui acceptent sont récompensés et les rebelles qui préfèrent leurs propres idées aux idées des aînés, punis. Mon ami Carlo Rovelli désirait un poste à Rome. On lui dit de voir un professeur, qui fut très aimable et lui expliqua tous les détails d'un projet de recherche fascinant qu'il poursuivait alors avec ses collègues. Carlo l'a remercié de cette discussion intéressante et répondit en décrivant au professeur son propre projet de recherche. L'entretien s'est brusquement terminé, et Carlo ne reçut jamais l'offre qu'il attendait. J'ai dû lui expliquer ce qui lui était arrivé. Comme nous tous à un moment ou un autre, il était alors assez naïf pour croire qu'on récompense les gens pour une idée originale.

Il fallut attendre que Carlo devienne le principal scientifique en Europe dans son champ de recherche pour que l'université de Rome lui offre un poste. Ce n'est qu'à ce moment-là – et après que Carlo a fait une carrière ailleurs, après qu'il a connu une influence certaine et que des centaines de chercheurs autour du globe ont commencé à explorer ses idées – que les professeurs puissants à Rome furent prêts à écouter les théories qu'il avait tenté de leur présenter quand il n'était qu'un docteur ès-sciences fraîchement sorti de thèse.

À ce point, vous pourriez vous demander comment Carlo a pu trouver un poste quelconque. Je vais vous le dire. À l'époque, à la fin des années 1980, le domaine de la relativité générale était dominé par quelques personnages seniors, d'anciens élèves d'Einstein qui tenaient fort à encourager les jeunes gens avec les meilleures idées, les plus indépendantes. Ils étaient en tête de ce qu'on appelait la « communauté de la relativité », représentée dans les universités américaines par une dizaine de groupes de recherche. En tant que représentants d'une discipline à part, ils occupaient une position dominante mais ne contrôlaient qu'un petit nombre de postes, peut-être pas plus d'un poste disponible tous les deux ou trois ans. Carlo était post-doc à Rome, mais en raison de certains problèmes bureaucratiques, son post-doc ne fut jamais officialisé et on ne lui a jamais versé de salaire. Chaque mois, on lui disait qu'après encore une réunion et quelques dossiers à remplir, il recevrait enfin son chèque. Un an et demi passa, puis il appela ses amis aux États-Unis et leur dit que, quoiqu'il eût voulu vivre en Italie, il en avait assez. Y avait-il des postes disponibles aux États-Unis ? Un des centres de relativité cherchait un professeur assistant, et quand ils s'aperçurent que Rovelli pouvait postuler, ils lui offrirent un billet d'avion et organisèrent

une audition, le tout en quelques semaines. Il faut aussi que je dise que *personne* dans ce centre ne travaillait sur la gravité quantique – ils ont recruté Carlo parce qu'il s'était montré capable de produire des idées nouvelles et d'importance certaine.

Une telle chose serait-elle possible aujourd'hui ? Probablement pas, car aujourd'hui même le champ de la relativité est dominé par un vaste programme de recherche avec un ordre du jour précis, dont ne décident que les chercheurs confirmés. Cet agenda est lié à l'astronomie expérimentale des ondes gravitationnelles et elle aspire (mais cela ne reste qu'une aspiration, même après plusieurs années) à mener des calculs sur ordinateur qui permettront de prédire ce qu'on devrait découvrir grâce aux expériences. Ces jours-ci, un jeune spécialiste en relativité générale ou en gravité quantique qui ne travaille pas principalement sur ces problèmes-là, a peu de chances de trouver un poste quelque part aux États-Unis.

Quelle que soit la discipline, le désir de succès est souvent tout ce qu'il faut pour transformer les rebelles d'antan en gardiens conservateurs de leurs programmes de recherche. Plus d'une fois je fus soumis à un lavage de cerveau de la part de mes collègues dans mon propre domaine de la gravité quantique, pour le soutien que j'avais accordé au recrutement de quelqu'un, extérieur au domaine, qui avait des idées nouvelles, au lieu d'embaucher un candidat techniquement habile qui travaillait sur les questions étroites faisant avancer d'un petit pas la recherche déjà en cours.

En réalité, il y a ici deux questions distinctes, qu'il faut bien séparer. La première est celle de la domination, dans le processus de prise de décision, des scientifiques seniors qui se servent souvent de leur pouvoir pour appuyer les programmes de recherche qu'ils ont eux-mêmes créé lorsqu'ils étaient jeunes et imaginatifs. La seconde question concerne le type des chercheurs que les universités souhaitent et peuvent embaucher. Recrutent-elles des personnes qui font un travail que tout le monde dans un champ de recherche donné sait comprendre et juger ? Ou se montrent-elles désireuses de recruter des gens qui inventent leurs propres chemins de recherche, tels que peu d'autres pourront le comprendre tout de suite ?

Tout cela est aussi lié à la question du risque. Les bons scientifiques ont une tendance à obtenir deux sortes de réponse de la part des évaluateurs. Les chercheurs normaux, à risque bas, reçoivent habituellement des réponses uniformes : tout le monde pense d'eux la même chose. Les scientifiques à risque élevé et les visionnaires ont tendance à susciter des réactions fortement polarisées. Parmi les juges, on trouve des gens qui croient profondément en eux et qui utilisent des mots forts pour exprimer cette croyance. Et d'autres en même temps, qui restent très critiques.

La même chose se produit quand les élèves évaluent leurs maîtres. Il existe un certain type de bons professeurs, à propos desquels les étudiants ne sont jamais neutres. Certains les aiment bien, et ils diront : « C'est le meilleur professeur que j'ai jamais eu. C'est pour rencontrer ce type de gens que j'ai décidé de faire mes études à l'université. » Mais d'autres seront fâchés et pleins de ressentiment, et se retiendront d'écrire quoi que ce soit sur la fiche d'évaluation. Si on prend ensuite la moyenne des notes – en réduisant toutes les

données à un seul chiffre, comme on le fait souvent pour décider des chances de promotion de tel ou tel professeur –, alors on passe à côté de quelque chose d'essentiel.

Au cours des années, j'ai remarqué que la distribution polarisée des réponses est un indicateur puissant du futur succès de la personne et de son influence en tant que scientifique. Si certains croient que Monsieur X est l'avenir de la science et que d'autres pensent que X est un pur désastre, cela pourrait indiquer que X est l'homme qu'il nous faut, qui mettra ses idées en avant et possède le talent et la ténacité pour s'y tenir jusqu'au bout. Un environnement qui accueille ceux qui prennent des risques se réjouira de compter parmi eux ce type de personnes, alors qu'un environnement hostile au risque les évitera.

En ce qui concerne les universités aux États-Unis, les gens ayant reçu des recommandations polarisées ne sont pas souvent recrutés. Bien que je ne l'aie observé que dans mon propre domaine, cela pourrait être une vérité générale. Si vous considérez les chercheurs que l'on admire tous pour leur audace et l'originalité de leurs contributions à notre compréhension de l'évolution : Per Bak, Stuart Kauffman, Lynn Margulis, Maya Paczuski et Robert Trivers, deux parmi eux sont des physiciens qui ont étudié les modèles mathématiques de la sélection naturelle, d'autres sont des théoriciens de l'évolution de premier plan. Aucun n'a fait sa carrière dans une université d'élite. Quand j'étais plus jeune, il m'arrivait de me demander pourquoi. Après un certain temps, j'ai compris qu'ils étaient trop indépendants intellectuellement. Leurs profils étaient bimodaux : si beaucoup les admiraient, il y avait aussi quelques scientifiques à des postes de pouvoir sceptiques à leur égard. En effet, il arrive souvent que les chercheurs de ce type, qui génèrent des idées, ne soient pas sans défaut lorsqu'on les mesure à l'aune des critères de jugement des scientifiques normaux. Il se peut qu'ils soient trop audacieux. Il n'est pas exclu qu'ils prennent peu de soin à exposer les détails de leur travail ou qu'ils ne fassent pas grande impression sur le plan technique. On fait souvent ce genre de critique aux penseurs originaux que leur curiosité et leur indépendance d'esprit ont conduits vers des domaines où les autres n'étaient jamais allés. Quelles que soient l'originalité ou l'utilité de leurs contributions, leur travail restera techniquement peu impressionnant au regard des spécialistes du domaine.

Il est également vrai qu'il n'est pas facile de communiquer avec certains de ces scientifiques créatifs et originaux. Ils peuvent manquer de patience. Ils s'expriment trop directement quand ils ne sont pas d'accord avec ce que vous dites et ne mettent pas à l'aise ceux pour qui la facilité de contact compte plus que la vérité. Ayant connu quelques personnages « difficiles » de ce genre, je soupçonne qu'ils sont en colère exactement pour la même raison que certaines femmes scientifiques très intelligentes : pendant toute leur vie, elles souffrent du sentiment que tout est fait pour qu'elles se sentent marginalisées.

Ce genre de problème a sans doute affecté la carrière de Per Bak, qui est tragiquement mort d'un cancer il y a quelques années, à l'âge de cinquante-quatre ans. Il possédait le rare privilège d'avoir écrit des articles dans quelques disciplines autres que son domaine principal, allant de l'économie à la cosmologie et la biologie. Ceci aurait dû faire de lui quelqu'un de très prisé par les meilleures des universités, mais le contraire s'est produit. Comme il n'était pas timide du tout, il disait ouvertement que sa façon d'analyser les pro-

blèmes l'avait conduit à des idées que les autres experts avaient manquées. Il aurait eu une carrière beaucoup plus réussie s'il avait utilisé sa créativité dans une seule discipline, mais il n'aurait pas été le Per Bak que nous connaissons.

Vous pourriez vous demander pourquoi toutes ces personnes intelligentes qui deviennent présidents de départements et directeurs de laboratoires n'ont pas encore compris tout cela et ne l'ont pas utilisé au profit de leurs établissements. Certes, quelques-uns l'ont compris et sont parmi les rares qui souhaitent recruter ce type de chercheurs. La plupart des postes ouverts au recrutement aux États-Unis depuis quelques dizaines d'années et réservés aux spécialistes des approches de la gravité quantique autres que la théorie des cordes, l'ont été parce que le directeur du département a trouvé une occasion de recruter quelqu'un dont le champ de recherche n'était pas représenté au sein de l'université. Libéré des contraintes habituelles de la politique départementale, il a fait une analyse coûts-bénéfices qui l'a convaincu qu'en ouvrant le poste dans un domaine peu soutenu, il pourrait obtenir, à l'instant même, un groupe de recherche de classe supérieure, qui valoriserait le statut de son département.

En fait, les problèmes dont nous sommes en train de discuter affectent l'ensemble de la science, et quelques scientifiques seniors influents, venus d'autres disciplines, ont exprimé leur inquiétude à ce sujet. Bruce Alberts est biologiste et ex-président de l'Académie nationale des sciences, l'organisation des scientifiques la plus prestigieuse et la plus puissante des États-Unis. Dans son discours présidentiel à l'Académie nationale en avril 2003, il a déclaré :

> Nous avons développé un système de stimulation pour les jeunes chercheurs qui est trop hostile au risque. De plusieurs façons, nous sommes nous-mêmes nos pires ennemis. Les commissions d'étude que nous créons pour évaluer les demandes de financement sont composées de collègues qui déclarent qu'ils admirent la prise de risque en science, mais qui choisissent habituellement, lorsqu'ils distribuent les ressources, d'investir dans une science sûre. L'effet d'étouffement pour l'innovation est énorme, car nos universités n'embauchent que des professeurs assistants dont on est certain qu'ils apporteront du financement une fois recrutés. Ceci explique pourquoi autant de jeunes parmi les meilleures font la science du voisin.

Alberts a décrit ensuite une tendance observée depuis 1991, selon laquelle la proportion des financements par les instituts nationaux de la santé attribués aux chercheurs de moins de trente-cinq ans a diminué de plus de 50 %, tandis que celle qui va aux chercheurs âgés de cinquante-cinq ans et plus a augmenté de plus de 50 %. Il s'est plaint de ce résultat, puisque celui-ci réduit très fortement l'indépendance intellectuelle des jeunes chercheurs :

> Beaucoup de mes collègues et moi-même avons reçu notre premier financement indépendant quand nous avions moins de trente ans. On n'avait pas de résultats préliminaires établis, puisque nous étions en train de tenter quelque chose de complètement nouveau. [Aujourd'hui], quasiment personne ne peut commencer une carrière scientifique indépendante avant l'âge de trente-cinq ans. De plus, lorsqu'en 1991, un tiers des responsables des projets de recherche financés par le NIH avaient moins de quarante ans, en 2002, cette proportion a diminué jusqu'à un sixième. Même les plus doués de nos jeunes n'ont pas d'autre choix que d'endurer plusieurs années de demandes de financement re-

fusées, avant d'obtenir enfin assez de « données préliminaires » pour assurer les évaluateurs qu'ils atteindront selon toute vraisemblance leurs buts.

Si le problème est à ce point évident que les leaders les plus éminents de la science américaine s'en inquiètent, pourquoi ne fait-on rien pour changer les choses ? Cela m'étonne depuis longtemps. Aujourd'hui, je comprends que la compétition pour obtenir et conserver les postes universitaires est plus importante que la question du mérite. Le système essaye de sélectionner les chercheurs les meilleurs, les plus productifs, et dans une certaine mesure il y réussit. Mais il existe aussi d'autres agendas et ordres du jour, et il serait trop naïf de les ignorer. Il est également important que les décisions prises dans le système de recrutement servent à établir et à renforcer le consensus à l'intérieur même de chaque discipline.

Le recrutement n'est pas le seul moyen d'instaurer ce consensus. Tout ce que je viens de dire à propos du recrutement est aussi vrai à propos des comités qui évaluent les demandes de financement. Ces deux sujets sont liés, car aux États-Unis on ne peut obtenir un poste scientifique permanent qu'à condition qu'on ait dans le passé attiré des fonds, et on ne peut se voir recruté à un poste quelconque qu'à condition d'avoir démontré son potentiel pour en attirer.

Quelques mois avant que je ne comprenne tout ceci pour la première fois, on m'a demandé d'écrire un article sur un sujet différent pour la *Chronicle of Higher Education*, une revue très lue par les administrateurs universitaires. J'ai écrit une lettre aux éditeurs en leur offrant, au lieu de cet article, un exposé des dangers, pour la liberté académique, de la domination des programmes de recherche à la mode. Ils se sont déclarés prêts à considérer ma proposition, mais l'ont rejetée dès qu'ils ont reçu le brouillon. J'étais outré : ils réprimaient le droit de ne pas être d'accord ! Je leur ai donc répondu par un message inhabituellement (pour moi) désagréable, qui remettait en question leur décision. À ce message, ils ont réagi immédiatement en disant que le problème n'était pas du tout que l'article était trop radical, bien au contraire. Tout ce que j'ai écrit était déjà bien connu et avait été dénoncé dans d'autres domaines de la recherche, en sciences sociales et humaines. Ils m'ont expédié une pile d'articles qu'ils avaient précédemment publiés sur les relations de pouvoir dans la prise de décision académique. Je les ai lus et ai vite compris que seuls les scientifiques semblaient encore ignorer ce problème.

Évidemment, il y a des raisons objectives de donner à quelqu'un un poste de titulaire. Jusqu'à un certain point, cela protège les scientifiques originaux et indépendants du renvoi et du remplacement par de jeunes carriéristes suivant la dernière mode intellectuelle. Mais le prix à payer pour ce système de titularisation est élevé : *les aînés ont trop de sécurité du travail, trop de pouvoir et trop peu de responsabilités ; les jeunes ont trop peu de sécurité du travail, trop peu de pouvoir et beaucoup trop de responsabilités, tout ceci au zénith de leur période la plus créative et la plus ouverte aux risques*.

Bien que la titularisation protège les chercheurs intellectuellement indépendants, elle ne les produit pas. Beaucoup de collègues m'ont dit travailler sur ce qui était à la mode pour obtenir un poste permanent, et qu'une fois ce poste obtenu, ils pourraient faire ce qu'ils

souhaitaient réellement. Mais les choses ne vont pas tout à fait ainsi. Je ne connais qu'un seul cas où cela s'est produit. Dans tous les autres, si les chercheurs n'ont pas eu assez de courage et d'indépendance d'esprit pour travailler sur ce qu'ils désiraient réellement quand ils se souciaient de l'obtention d'un poste permanent, ils n'acquièrent pas soudainement ce courage et cette indépendance lorsqu'ils songent à la décision que le comité d'évaluation va prendre à l'égard de leur prochaine demande de financement. Cela n'aide pas à instaurer un système qui protège l'indépendance intellectuelle des chercheurs, si ce même système rend peu probable qu'une personne ayant cette indépendance intellectuelle ait un poste permanent.

De fait, les professeurs titulaires qui perdent le financement des agences parce qu'ils bifurquent vers un domaine de recherche plus risqué, peuvent facilement se retrouver dans les pires ennuis. On ne peut pas les renvoyer, mais on peut faire pression sur eux en les menaçant de réductions de salaire et d'une augmentation de la charge d'enseignement, pour qu'ils reviennent à un travail sans risque et bien financé, ou qu'ils prennent leur retraite.

Voici ce qu'a écrit Isador Siner, un talentueux professeur de mathématiques du MIT, à propos de l'état de son champ de recherche :

> J'observe une tendance vers la spécialisation prématurée, motivée par des arguments économiques. Vous devez rapidement montrer des promesses d'obtention de lettres de recommandation favorables pour obtenir votre premier poste. Vous n'osez pas vous permettre de digresser avant d'être établi en tant que scientifique à un poste sûr. Les réalités de la vie imposent un rétrécissement de perspective qui n'est pas inhérent aux mathématiques. Avec les ressources nouvelles, on peut faire barrage à la spécialisation excessive, ce qui donnera aux jeunes plus de liberté qu'actuellement, pour explorer les mathématiques plus largement ou les liens avec d'autres disciplines comme la biologie, où il reste encore beaucoup à découvrir[53].

Le mathématicien français Alain Connes émet des critiques semblables :

> La pression constante [du système américain] dans le sens de la productivité réduit l'» unité de temps » pour la majorité des jeunes. Les débutants n'ont pas d'autre choix que de trouver un directeur de thèse [qui] est sociologiquement bien implanté (de telle sorte qu'à une étape ultérieure, il ou elle écrira des lettres de recommandation pertinentes et obtiendra un poste pour l'étudiant) et d'écrire par la suite une thèse technique montrant qu'ils ont de bons muscles, tout ceci en un temps limité, ce qui les empêche d'apprendre ce qui nécessite quelques années de dur labeur. Certes, on est toujours en manque de bons techniciens, mais ce n'est qu'une fraction de ce qui génère le progrès scientifique... De mon point de vue, le système actuel aux États-Unis décourage réellement les véritables penseurs originaux, puisque cette aptitude est souvent accompagnée d'une maturation lente sur le plan technique. De plus, la façon dont les jeunes obtiennent leurs postes sur le marché crée des « féodalités », à savoir, quelques domaines de recherche bien implantés dans les universités majeures qui se reproduisent sans laisser place aux disciplines nouvelles...
>
> Le résultat est qu'il n'existe que peu de sujets qu'on élabore et qui attirent les étudiants, et, bien sûr, cela ne crée pas de bonnes conditions pour qu'émergent des champs nouveaux de recherche[54].

Au cours des dernières décennies, le monde des affaires a appris que la hiérarchie était trop coûteuse, il s'est donc transformé pour donner plus de pouvoir et plus de possibilités aux jeunes. Il existe aujourd'hui de jeunes banquiers ou de jeunes ingénieurs informatiques d'une vingtaine d'années, à la tête de projets importants. De temps en temps, on rencontre aussi un scientifique universitaire chanceux qui a connu un tel succès, mais c'est très rare. Beaucoup de chercheurs atteignent l'âge de trente-cinq ans avant de sortir de l'enfance forcée dans laquelle les maintient leur position de post-docs.

Les leaders des compagnies high-tech savent que si vous voulez recruter les meilleurs jeunes ingénieurs, il vous faut aussi de jeunes gestionnaires. C'est vrai pour les autres champs créatifs, comme le monde de la musique. Je suis sûr que certains jazzmen et les vieux rockers apprécient hip-hop et techno, mais l'industrie musicale ne laisse pas les exstars sexagénaires choisir pour eux les jeunes musiciens qui signeront des contrats avec les studios. L'innovation en musique avance d'un pas vibrant et trépidant parce que les jeunes musiciens peuvent toujours trouver des occasions de rentrer rapidement en contact avec le public et avec leurs pairs, grâce à la radio et dans les clubs, sans demander l'autorisation d'artistes confirmés qui poursuivent toujours leurs propres carrières.

Il est intéressant que la révolution quantique ait été faite par une génération de scientifiques quasiment orpheline. De nombreux membres de la génération précédente furent massacrés pendant la Première Guerre mondiale. Tout simplement, il n'y a pas eu autour d'eux beaucoup de scientifiques seniors qui auraient pu leur dire qu'ils étaient fous. Aujourd'hui, pour qu'un thésard ou un post-doc survive, il est obligé de produire un travail compréhensible par des professeurs proches de l'âge de la retraite. Faire de la science de cette manière est comme conduire une voiture le frein à main serré.

La science nécessite un équilibre entre rébellion et respect, et il y aura toujours des querelles entre radicaux et conservateurs. Mais, aujourd'hui, il n'y a pas d'équilibre dans le monde académique. Plus que jamais en histoire des sciences, les cartes sont distribuées contre les révolutionnaires. Ceux-ci ne sont simplement pas tolérés au sein des universités. En conséquence, il n'est pas surprenant que même si la science en réclame clairement une, nous n'arrivons pas à déclencher de révolution.

20

Ce que nous pouvons faire pour la science

J'ai tenté dans ce livre d'expliquer pourquoi la liste des cinq grands problèmes de physique est restée exactement la même depuis trente ans. Pour pouvoir mener à bien mon projet, j'ai dû me concentrer sur la théorie des cordes, mais je veux répéter encore que mon but n'était pas de la diaboliser. La théorie des cordes est une idée puissante et bien motivée, qui mérite l'énorme travail qui lui a été consacré. Si, jusqu'à aujourd'hui, elle a échoué, c'est parce que ces défauts intrinsèques sont intimement liés à ces points forts. Bien sûr, l'histoire n'est pas finie et il se pourrait bien que la théorie des cordes soit une partie de la vérité. La question véritable n'est pas de savoir pourquoi on a dépensé tant d'énergie à élaborer la théorie des cordes, mais pourquoi on n'en a pas dépensé autant – et de loin – à développer des approches alternatives.

Quand j'ai dû choisir entre travailler sur les fondements de la mécanique quantique et ainsi saboter ma carrière, ou travailler sur un thème lié à la physique des particules et la développer, il y avait un argument scientifique en faveur de cette décision économique. Il était évident que durant les décennies précédentes, beaucoup plus de progrès avaient été accomplis en physique des particules que dans le renforcement des fondements de la théorie quantique. Un jeune thésard se trouve aujourd'hui dans une situation très différente : depuis vingt ans, on n'a vu que peu de progrès en théorie des particules, mais beaucoup de progrès dans le domaine des fondements de la physique, provoqués par le développement de la computation quantique.

À ce jour, il est devenu clair qu'on ne pourra résoudre les cinq grands problèmes qu'à condition de réfléchir véritablement sur les fondements de notre compréhension de l'espace, du temps et du monde quantique, et de ne plus considérer les programmes de recherche vieux de dizaines d'années telles la théorie des cordes et la gravité quantique à boucles comme des paradigmes établis. On a besoin de jeunes chercheurs, ayant le courage, l'imagination et la profondeur conceptuelle pour initier des directions nouvelles. Comment peut-on trouver et soutenir ce type de scientifiques, au lieu de les décourager comme on l'a fait jusqu'à ce jour ?

Je dois encore souligner que je ne crois pas qu'il faille blâmer un quelconque scientifique en particulier pour le marasme dans lequel se trouve la physique théorique. De nom-

breux théoriciens des cordes de ma connaissance sont de très bons chercheurs. Ils ont accompli un travail formidable. Je ne dis pas qu'il aurait fallu qu'ils fassent mieux, seulement qu'il est remarquable que beaucoup parmi les meilleurs d'entre nous n'aient pu réussir avec une si bonne idée de départ.

Le monde de la science académique est confronté à un phénomène sociologique. Je pense effectivement que l'éthique des sciences a été dans une certaine mesure corrompue par le genre de pensée de groupe dont il a été question au chapitre 16, et pas seulement au sein de la communauté de la théorie des cordes. Pour commencer, c'est la communauté académique au sens large qui établit les règles. Devant un tribunal, un bon avocat fera son possible dans les limites de la loi pour faire triompher la cause de son client. Nous devons donc nous attendre à ce que les leaders d'une discipline scientifique fassent, de la même façon qu'un avocat devant un tribunal, tout ce qui est permis par le droit coutumier du monde académique pour faire avancer leur programme de recherche. Si le résultat est une prise de contrôle prématurée de toute la recherche par des idées bénéficiant d'une campagne de promotion agressive, qui réalisent leur domination en promettant plus de choses qu'elles ne peuvent en donner, alors on ne peut pas blâmer exclusivement les leaders du domaine, qui ne font que leur travail, fondé sur leur conception de la science. Nous sommes tous collectivement responsables, nous scientifiques universitaires et académiques, qui créons collectivement les règles du jeu et évaluons les revendications de nos collègues.

Ce serait peut-être trop demander à ceux qui travaillent dans ce domaine de vérifier tous les résultats qu'on leur soumet avant de les accepter. On peut laisser aux experts des sous-domaines le soin de le faire, et c'est ce qui se passe en réalité. Mais il nous appartient, à nous tous, de suivre au moins le déroulement des preuves et les conclusions qui en sont tirées. De même que mes collègues, j'ai commis la faute d'avoir pris pour argent comptant des croyances largement partagées à propos de la théorie des cordes, bien qu'elles ne trouvassent aucun soutien dans la littérature scientifique.

Par conséquent, la bonne question à se poser est celle-ci : qu'est-il advenu des contraintes habituelles de l'éthique scientifique ? Comme nous l'avons déjà vu, il y a un problème dans la façon dont se structure la science académique, qui se manifeste dans des pratiques comme l'évaluation par les comités des pairs et le système des postes titulaires. Ce problème est, en partie, responsable de la domination de la théorie des cordes, mais une part égale de la responsabilité revient à la confusion entre science normale et science révolutionnaire. La théorie des cordes a commencé comme une tentative de révolutionner la science et, déjà, elle est considérée comme un programme de recherche de plus, parmi ceux de la science normale.

Quelques chapitres plus haut, j'ai suggéré qu'il existe deux sortes de physiciens théoriciens : les maîtres artisans, qui font marcher la science normale, et les visionnaires, qui savent voir au-delà des présupposés non justifiés, mais universellement tenus pour vrais, et poser les questions nouvelles. Il doit être parfaitement clair à ce stade que pour mener à bien une révolution scientifique, il nous faut plus de visionnaires. Mais, comme on l'a déjà vu, ces gens-là sont marginalisés ou même exclus des cercles universitaires et académiques, et on ne considère plus, comme jadis, qu'ils font partie de la tendance majoritaire en phy-

sique théorique. Si notre génération de théoriciens a raté la révolution, c'est parce que nous avons structuré les institutions de recherche de telle sorte qu'on n'y trouve que très peu de révolutionnaires, qui de toute façon ne seraient pas écoutés.

J'en ai conclu deux choses. Nous devons reconnaître l'existence des symptômes de la pensée de groupe, et nous battre contre elle, et nous devons ouvrir les portes à un vaste panel de penseurs indépendants, tout en nous assurant qu'une place dans le monde académique sera réservée à ces personnages atypiques dont nous avons grand besoin pour mener notre révolution. Beaucoup dépend de la manière dont nous traiterons la génération suivante. Pour maintenir la recherche en bonne santé, il faut recruter et soutenir les jeunes chercheurs en nous fondant seulement sur leurs aptitudes, leur créativité et leur indépendance d'esprit, sans se soucier s'ils travaillent dans un programme de recherche établi. Ceux qui inventent et développent leurs propres programmes de recherche devraient même avoir la priorité, car ils ont besoin de liberté intellectuelle pour élaborer l'approche qu'ils croient plus prometteuse. La gouvernance scientifique revient toujours à faire des choix. Pour se garder d'un surinvestissement dans une direction qui pourrait se révéler une impasse, les départements de physique doivent s'assurer que des programmes de recherche rivaux avec des points de vue différents sur des problèmes ouverts sont bien représentés – pas seulement parce que, la plupart du temps, on ne peut pas prédire quelles options seront les bonnes, mais aussi parce qu'une rivalité amicale entre les gens intelligents qui travaillent en étroite proximité est souvent source d'idées et de directions nouvelles.

Il faut encourager une attitude ouvertement critique et franche. Il faut pénaliser les gens qui font un travail superficiel, qui ignorent les problèmes fondamentaux difficiles, et il faut récompenser ceux qui s'attaquent aux conjectures restées en suspens depuis longtemps, même si, pour avancer, il leur fallait plusieurs années. Il faut donner plus de place à ceux qui réfléchissent soigneusement et en profondeur sur les questions fondamentales de l'espace, du temps et de la théorie quantique.

Beaucoup de problèmes sociologiques dont il a été question relèvent d'une tendance commune aux scientifiques – et aux êtres humains en général – de former des tribus. Pour se battre contre cette tendance « tribalisante », il appartient aux théoriciens des cordes d'abolir les frontières entre théorie des cordes et autres approches. Les théoriciens des cordes pourraient cesser de catégoriser tous les théoriciens en loyaux ou en traîtres à telle ou telle conjecture. Pour notre profit commun, les chercheurs qui explorent les alternatives à la théorie des cordes, ou qui sont critiques par rapport à celle-ci, devraient être invités à exposer leurs opinions aux colloques de la théorie des cordes. Les groupes de recherche devraient attirer les post-docs, les étudiants et les visiteurs qui explorent des approches concurrentes. Il faut également encourager les étudiants à se former à, et travailler sur, les approches alternatives aux problèmes laissés en suspens, de sorte qu'ils soient compétents pour choisir eux-mêmes les directions les plus prometteuses à poursuivre pour leurs carrières.

Nous, physiciens, devons faire face à la crise. Une théorie scientifique qui ne prédit rien et qui, par conséquent, n'est pas liée à l'expérimentation, n'échouera jamais, mais une telle

théorie ne réussira jamais non plus, au moins aussi longtemps que ce qu'on entend par *science* demeure « une connaissance acquise à travers un argument rationnel confirmé par l'expérience ». Il faut mener une évaluation honnête pour savoir s'il est sage de s'associer à un programme de recherche qui, étant élaboré depuis quelques décennies, n'a pas réussi à se procurer de preuves expérimentales, ni une formulation mathématique précise. Les théoriciens des cordes doivent nous regarder droit dans les yeux et accepter la possibilité que tout leur travail soit faux, et celui des autres, vrai.

Enfin, un grand nombre de mesures pourraient être prises par les institutions scientifiques pour maintenir la recherche en bonne santé. Les agences de financement et les fondations doivent donner les moyens aux chercheurs de tous niveaux d'explorer et d'élaborer des propositions viables visant à résoudre des problèmes essentiels et difficiles. Il ne faut pas permettre à un programme de recherche d'occuper une place dominante dans les institutions, avant même que ce programme ne soit parvenu à rassembler un ensemble convaincant de preuves scientifiques. Tant que ce n'est pas le cas, il faut soutenir les approches alternatives, de sorte que le progrès scientifique ne soit pas arrêté en raison d'un surinvestissement dans une mauvaise direction. Quand apparaît un tel problème, il faut poser une limite au soutien accordé à chaque programme de recherche individuel qui prétend le résoudre ; par exemple, pas plus d'un tiers du financement total.

Certaines de ces propositions demandent des réformes majeures mais, quand il s'agit de physique théorique, il n'est pas question de beaucoup d'argent. Supposez qu'une agence ou une fondation décide de financer à cent pour cent *tous* les visionnaires hors norme qui développent leurs propres programmes de recherche ambitieux, essayant de résoudre les questions clefs de la gravité quantique et de la théorie quantique. Il s'agit peut-être d'une vingtaine de théoriciens. Les soutenir pleinement ne prendra qu'une fraction minuscule de n'importe quel budget national dédié à la physique. Pourtant, si l'on fonde notre jugement sur les contributions que de tels chercheurs ont apportées par le passé, il est probable que quelques-uns feront des découvertes suffisamment importantes pour que cet investissement soit de loin le meilleur parmi ceux accordés à la physique.

En effet, même les fondations de petite taille pourraient apporter leur aide à cette cause, en identifiant les visionnaires indépendants ayant soutenu une thèse en physique théorique ou en mathématiques et travaillant sur leurs propres approches d'un problème fondamental – c'est-à-dire, les gens portés sur un domaine si peu conventionnel que leurs chances de poursuivre une carrière académique sont presque nulles. Des gens comme Julian Barbour, Antony Valentini, Alexander Grothendieck ou – pourquoi pas – Einstein. Offrez-leur cinq ans de soutien, prorogeables une ou même deux fois s'ils avancent dans leurs recherches.

Cela vous paraît risqué ? La Royal Society en Grande Bretagne a créé un tel programme, responsable du début de la carrière de quelques chercheurs, aujourd'hui d'importants scientifiques dans leurs domaines et qui, probablement, n'auraient jamais réussi aux États-Unis faute de pouvoir obtenir un tel soutien.

Comment pourrait-on sélectionner les personnes à soutenir ? C'est facile. Posez la question à qui pratique déjà la science de cette façon. Pour que les choses soient sûres, trouvez

au moins un chercheur confirmé, appartenant au domaine scientifique du candidat et particulièrement fasciné par les accomplissements potentiels du travail du candidat. Pour que les choses soient plus sûres encore, trouvez au moins un professeur pensant que le candidat est un chercheur épouvantable qui échouera certainement.

Cela peut vous paraître étrange qu'on discute de la politique académique dans un livre destiné au grand public, mais c'est vous, public, chacun pris individuellement mais également tous ensembles, qui êtes à la fois notre protecteur et notre mécène. Si le travail scientifique pour lequel vous payez n'est pas fait en réalité, alors c'est à vous de nous mettre des coups de pied aux fesses et de nous obliger à faire notre travail.

En conséquence, voici – pour finir – mes derniers mots destinés à des lecteurs différents.

Au public cultivé : soyez critique. Ne croyez pas à tout ce que l'on vous raconte. Quand un scientifique affirme avoir fait une découverte importante, demandez-lui les preuves. Évaluez ces preuves aussi rigoureusement que si vous alliez investir votre propre argent. Étudiez-les aussi scrupuleusement qu'une maison qu'on vous propose d'acheter, ou une école où vous comptez envoyer vos enfants.

À ceux qui prennent des décisions concernant l'avenir de la science – c'est-à-dire, aux directeurs des départements, présidents des comités d'évaluation, doyens des facultés, agents des fondations privées et fonctionnaires des agences gouvernementales : ce n'est qu'à votre niveau que nous pourrons mettre en pratique des recommandations dans le genre de celles que je viens d'énoncer. Pourquoi ne pas les étudier ? Il s'agit de propositions dont on doit discuter dans des lieux comme les bureaux de la National Science Foundation, de la National Academy of Sciences et de leurs équivalents partout dans le monde. Le problème ne se limite pas à la physique théorique. Si un champ de recherche aussi discipliné que la physique est vulnérable aux symptômes de la pensée de groupe, que pourrait-il se passer dans d'autres domaines moins rigoureux ?

À mes collègues les physiciens théoriciens : nous sommes tous responsables des problèmes dont il est question ici. Nous constituons une élite de la science uniquement parce que la société au sens large, dont nous faisons partie, se soucie profondément de la vérité. Si la théorie des cordes est fausse mais continue à dominer notre discipline, alors les conséquences seront dramatiques, pour nous personnellement et pour l'avenir de notre métier. C'est à nous qu'il appartient d'ouvrir les portes pour accueillir des approches alternatives et d'augmenter de façon générale le niveau d'argumentation.

Pour le dire très franchement : si vous êtes quelqu'un dont la première réaction, quand on questionne vos croyances scientifiques, est de ce genre-ci : « Et qu'est-ce qu'en pense X ? » ou « Comment pouvez-vous parler ainsi ? Tout le monde sait que... » – alors vous courez le danger de ne plus être chercheur. On vous paie un bon salaire pour que vous fassiez votre boulot, et cela signifie que vous avez la responsabilité d'évaluer de façon attentive et indépendante tout ce à quoi vous-même ou vos collègues croient. Si vous ne pouvez pas défendre rigoureusement vos croyances et vos engagements, en cohérence avec les faits expérimentaux, si vous laissez aux autres le soin de penser pour vous (même s'ils sont seniors et puissants), alors vous ne remplissez pas vos obligations éthiques de membre de la communauté scientifique. Votre diplôme de doctorat est une autorisation de possé-

der votre propre point de vue et de forger votre jugement. Mais c'est plus que cela : il vous oblige à réfléchir de manière critique sur tout ce qui appartient à votre domaine de compétence professionnelle.

C'est dur. Mais voici des mots encore plus sévères pour ceux d'entre nous qui travaillent sur les problèmes fondamentaux et qui ne sont pas théoriciens des cordes. Notre mission doit être de chercher les faux présupposés, de poser des questions nouvelles, de trouver des réponses nouvelles et d'être à la tête de la révolution. Il est facile d'identifier les points où la théorie des cordes a probablement tort, mais la critiquer n'est pas notre travail. Notre travail consiste à inventer la bonne théorie.

Je serai plus sévère encore envers moi-même. Je m'attends tout à fait à ce que certains lecteurs reviennent envers moi en me disant : « Et si vous êtes si intelligent, pourquoi n'avez-vous pas fait mieux que les théoriciens des cordes ? » Ces lecteurs auront raison. Finalement, ce livre est une forme de procrastination. Certes, j'espère qu'en l'écrivant, je faciliterai le chemin pour ceux qui viendront après. Mais mon métier est la physique théorique, et mon travail est d'achever la révolution qu'Einstein a commencée. Je ne l'ai pas fait, ce travail.

Que vais-je donc faire maintenant ? Je vais essayer de tirer avantage de la bonne fortune que la vie m'a donnée. D'abord, je vais dénicher mon vieil article, « Sur la relation entre les fluctuations quantiques et thermiques », et je vais le relire. Ensuite, je vais éteindre mon téléphone et mon Blackberry, mettre du Bebel Gilberto, de l'Esthero et du Ron Sexsmith, augmenter le volume au maximum, tout effacer sur mon tableau noir, aller chercher de la bonne craie, ouvrir un cahier neuf, prendre mon stylo favori, m'asseoir, commencer à penser.

Remerciements

Un livre commence par une idée, et je la dois à John Brockman qui s'est rendu compte que je voulais écrire autre chose qu'une obscure monographie étudiant la relation entre science et démocratie. C'est un des thèmes de ce livre, mais, comme Brockman l'avait prévu, l'argument prend beaucoup plus de force une fois développé dans le contexte d'une controverse scientifique particulière. Je lui suis redevable ainsi qu'à Katinka Matson pour leur soutien continu, ainsi que pour l'invitation à rejoindre une communauté de la troisième culture. M'offrant un contexte au-delà de ma spécialisation, ils ont changé ma vie.

Aucun auteur ne peut avoir de rédacteur meilleur qu'Amanda Cook, et je suis gêné de devoir admettre dans quelle mesure tout ce qu'on trouve de bien ici est dû à sa houlette et à ses interventions. Sara Lippincott a complété le travail avec une élégance et une précision pour lesquelles tout écrivain serait prêt à se tuer. C'était un honneur de collaborer avec elles deux. Holly Bemiss, Will Vincent et tous les autres chez Houghton Mifflin se sont occupés de ce livre avec enthousiasme, et beaucoup d'habileté.

Au cours des dernières décennies, plusieurs collègues m'ont donné de leur temps pour me former à la théorie des cordes, la supersymétrie et la cosmologie. Parmi eux, je suis particulièrement reconnaissant à Nima Arkani-Hamed, Tom Banks, Michael Dine, Jacques Distler, Michael Green, Brian Greene, Gary Horowitz, Clifford Johnson, Renata Kallosh, Juan Maldacena, Lubos Motl, Hermann Nicolai, Amanda Peet, Michael Peskin, Joe Polchinski, Lisa Randall, Martin Rees, John Schwarz, Steve Shenker, Paul Steinhardt, Kellogg Stelle, Andrew Strominger, Leonard Susskind, Cumrun Vafa et Edward Witten pour leur temps et pour leur patience. Si nous ne sommes pas toujours d'accord, j'espère qu'il est bien clair que ce livre n'est pas une prise de position ultime, mais un argument soigneusement structuré, dont le but est de contribuer à la conversation continue que j'ai entreprise avec respect et admiration pour leurs efforts. S'il s'avère que le monde a onze dimensions et qu'il est supersymétrique, je serai le premier à applaudir à leur triomphe. Pour l'instant, je les remercie d'avance de me permettre d'expliquer pourquoi, après y avoir mûrement réfléchi, je ne crois plus que cela soit probable.

Ceci n'est pas une histoire scolaire, j'ai cependant raconté plein d'histoires et quelques amis et collègues ont généreusement offert leur temps pour m'aider à raconter des histoi-

res vraies plutôt que perpétuer des mythes. Julian Barbour, Joy Christian, Harry Collins, John Stachel et Andrei Starinets m'ont fourni des remarques scientifiques précises sur l'ensemble du manuscrit. Bien évidemment, les erreurs qui y sont contenues sont de mon seul fait, tout comme les conséquences de mes choix visant à rendre le livre aussi accessible que possible. Les corrections et idées futures seront publiées sur un site web dédié à ce livre. Les autres amis et membres de ma famille qui ont lu et critiqué très utilement le manuscrit sont Cliff Burgess, Howard Burton, Margaret Geller, Jaume Gomis, Dina Graser, Stuart Kauffman, Jaron Lanier, Janna Levin, João Magueijo, Patricia Marino, Fotini Markopoulou, Carlo Rovelli, Michael Smolin, Pauline Smolin, Roberto Mangabeira Unger, Antony Valentini et Eric Weinstein. Chris Hull, Joe Polchinski, Pierre Ramond, Jorge Russo, Moshe Rozali, John Schwarz, Andrew Strominger et Arkady Tseytlin m'ont également aidé à clarifier quelques aspects particuliers.

Pendant de nombreuses années, ma recherche a été confortablement soutenue par la National Science Foundation, à qui je reste très reconnaissant. J'ai eu par la suite la chance extraordinaire de rencontrer quelqu'un qui m'a demandé : « Qu'est-ce que vous voudriez *vraiment* faire ? Quelle est votre idée la plus ambitieuse et la plus folle ? » De façon inattendue et généreuse, Jeffrey Epstein m'a offert l'occasion de tenter de vérifier mes vues, je lui en serai toujours profondément reconnaissant.

Ce livre est en partie dédié aux valeurs qui doivent être celles de la communauté scientifique et j'ai eu la chance de tenir les miennes des pionniers de la recherche de l'espace-temps quantique : Stanley Deser, David Finklestein, James Hartle, Chris Isham et Roger Penrose. Je n'aurais pu avancer dans cette recherche sans le soutien et la collaboration d'Abhay Ashtekar, Julian Barbour, Louis Crane, Ted Jacobson et Carlo Rovelli. Je dois beaucoup également à mes collaborateurs plus récents, Stephon Alexander, Mohammad Ansari, Olaf Dreyer, Jerzy Kowalski-Glikman, João Magueijo et, tout particulièrement Fotini Markopoulou, pour les critiques et les questionnements continus qui me forcent à rester honnête et qui m'arrêtent net quand je me prends trop au sérieux. Il faut aussi dire que notre travail n'aurait aucun sens sans la grande communauté des physiciens, mathématiciens et philosophes qui ignorent la mode académique et qui se consacrent aux problèmes des fondements de la physique. Avant tout, ce livre leur est dédié.

Mon travail et ma vie auraient été indéniablement plus pauvres sans le soutien de mes amis qui ont permis que je fasse de la science, mais qui ont aussi compris son contexte plus large. Parmi eux, je nomme Saint Clair Cemin, Jaron Lanier, Donna Moylan, Elizabeth Turk et Melanie Walker.

Chaque livre transmet un esprit des lieux. Les deux premiers étaient New York et Londres. Ce livre transmet aussi l'esprit de Toronto ; Pico Iyer appelle cette ville « ville du futur », et je crois que j'ai la chance de savoir pourquoi. Pour avoir accueilli un immigré au moment incertain de septembre 2001, je dois tout d'abord remercier Dina Graser, mais aussi Charlie Tracy Macdougal, Olivia Mizzi, Hanna Sanchez et les habitués du Outer Harbour Centreboard Club (si vous ne m'avez pas beaucoup vu sur l'eau au printemps dernier, voilà pourquoi !)

Je dois remercier Howard Burton et Mike Lazaridis de m'avoir invité. Je ne connais aucune action visionnaire et de soutien à la science plus grande que la création de l'Institut Perimeter de physique théorique. Ils méritent pour leur foi en l'avenir de la science et pour leur dévouement permanent au succès de l'Institut les plus beaux éloges qu'on puisse accorder. Ils ont toute ma reconnaissance pour les possibilités qu'ils m'ont offertes, sur le plan scientifique et personnel.

Pour nos aventures partagées et les défis dans la construction de cet institut et de cette communauté, tous mes remerciements à Clifford Burgess, Freddy Cachazo, Laurent Freidel, Jaume Gomis, Daniel Gottesman, Lucien Hardy, Justin Khoury, Raymond Laflamme, Fotini Markopoulou, Michele Mosca, Rob Myers, Thomas Thiemann, Antony Valentini et les autres, trop nombreux pour les nommer tous, qui ont risqué leurs carrières pour contribuer à cette entreprise. Bien qu'il soit inutile de le dire, je voudrais préciser une nouvelle fois que chaque mot de ce livre traduit ma position personnelle et ne reflète en aucune façon ni la position officielle ou non officielle du Perimeter Institute, ni celle de ses chercheurs ou de ses fondateurs. Au contraire, ce livre a été rendu possible grâce à ma participation à une communauté de scientifiques qui vante les mérites d'un désaccord scientifique honnête et qui sait qu'une discussion agitée ne doit pas empêcher l'amitié, ni le soutien mutuel dans nos efforts pour faire progresser la science. S'il existait plus d'endroits comme Perimeter, je n'aurais pas eu besoin d'écrire ce livre.

Enfin, merci à mes parents pour leur amour continu et inconditionnel et pour leur soutien, et merci à Dina pour tout ce qui fait de la vie une joie, ce qui remet tous les sujets de ce livre dans le contexte qui est le leur.

Notes

Introduction

1. Mark Wise, « Modifications to the Properties of the Higgs Boson ». Exposé au séminaire du 23 mars 2006. Disponible au : http://perimeterinstitute.ca, rubrique « Seminars ».
2. Brian Greene, *The Fabric of the Cosmos : Space, Time, and the Texture of Reality*, New York, Alfred A. Knopf, 2005, p. 376. Traduction française : *La magie du cosmos, l'espace, le temps la réalité*, Robert Laffont, 2005.
3. Gerard 't Hooft, *In Search of the Ultimate Building Blocks*, Cambridge, Cambridge University Press, 1996, p. 163.
4. Cité dans *New Scientist*, « Nobel Laureate Admits String Theory Is in Trouble », 10 décembre 2005. Cela a nourri une controverse, et Gross a clarifié ses remarques lors de l'ouverture de la 23e école d'hiver de Jérusalem de physique théorique.

   > Ce que j'entendais réellement par ceci est que nous ne connaissons toujours pas la réponse à la question de ce qu'est la théorie des cordes et si elle est, ou pas, la théorie ultime, par conséquent, on a besoin de modifications conceptuelles profondes... particulièrement en ce qui concerne la nature de l'espace et du temps. Mais loin d'être un argument en faveur de l'arrêt de l'exploration de la théorie des cordes – elle a échoué, elle est finie – l'époque actuelle est une période merveilleuse.

5. J. Polchinski, exposé au 26e institut d'été du SLAC de physique des particules, 1998, hep-th/9812104.
6. http://motls.blogspot.com/2005/09/why-no-new-einstein-ii.html
7. Lisa Randall, « Designing Words », in *Intelligent Thought : Science Versus the Intelligent Design Movement*, éd. John Brockman, New York, Vintage, 2006.

Partie I

1. Cinq grands problèmes de la physique théorique

1. John Stachel, « How Did Einstein Discover Relativity ? », http://www.aip.org/history/einstein/essay-einstein-relativity.htm. Je dois dire que certains philosophes des sciences pensent que la relativité générale est au moins partiellement une

théorie constructive ; ici je la prends pour une théorie principielle, car elle décrit la façon dont l'espace, le temps et le mouvement doivent être décrits quel que soit le contenu matériel de l'univers.

2. Le mythe de la beauté

2. Le lecteur doit tenir compte du fait que je simplifie intentionnellement cette histoire. Il existait d'autres expériences essentielles, liées au passage de la lumière à travers l'eau courante ou à l'effet que produit le mouvement relatif de la Terre et d'une étoile sur les observations de la lumière venant de cette étoile. De même, Einstein n'était pas le seul à comprendre que la bonne réponse devait être fondée sur le principe de relativité ; le même constat fut fait par le grand mathématicien et physicien français Henri Poincaré.

3. Le monde comme géométrie

3. J'avoue que ce n'est pas la façon dont Nordström a résolu le problème, mais il aurait pu le résoudre ainsi. En fait, c'est la voie suivie plus tard par les adeptes des dimensions supérieures et elle représente une amélioration de ce que fit Nordström.
4. Il existe une condition supplémentaire : ceci ne s'applique qu'aux observations qui ont lieu dans les petites régions de l'espace pendant des intervalles temporels courts. Si l'on s'éloigne assez pour s'apercevoir que la force du champ gravitationnel change, on peut distinguer la gravité de l'accélération.
5. Un expert pourrait préférer voir ici la notion plus précise d'inertie, mais j'ai découvert que celle-ci est troublante pour les lecteurs non spécialistes.
6. Excepté, bien sûr, le cas de la matière noire et de l'énergie noire, comme on l'a vu plus haut.
7. Cité dans Hubert F. M. Goenner, *On the History of Unified Field Theories (1914 -1933)*, p. 30. Disponible au : http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2004-2/index.html (2004).
8. *Ibid.*, p. 38-39.
9. *Ibid.*, p. 39.
10. *Ibid.*, p. 35.
11. Cité dans Abraham Pais, *Subtle Is the Lord*, New York, Oxford Univ. Press, 1982, p. 330. Tr. fr. : *Albert Einstein : La vie et l'œuvre*, Dunod, 2005.
12. *Ibid.*, p. 332.
13. *Ibid.*
14. *Ibid.*, p. 334.

4. L'unification devient science

15. Les lecteurs intéressés peuvent en apprendre plus en lisant ce que j'ai écrit sur les symétries de jauge au chapitre 4 de mon livre *The Life of the Cosmos*, New York, Oxford University Press, paru en 1997.
16. Bien que cela ne soit pas nécessaire pour la suite, certains lecteurs souhaiteraient peut-être en savoir plus sur la façon dont fonctionne ce principe. Voici l'idée principale : d'habitude, les opérations qui définissent une symétrie doivent être appliquées au système dans son en-

semble. Pour démontrer qu'un objet est symétrique sous les rotations, on doit tourner l'objet comme un tout. Par exemple : on ne peut pas ne tourner qu'une partie d'un ballon. Mais il existe des cas spéciaux, où la symétrie marche même si on l'applique à une partie du système seulement. On appelle ce type de symétrie, « symétries locales ». Cela paraît contredire l'intuition ; comment une chose pareille serait-elle possible ? Il est difficile de l'expliquer sans mathématiques, mais il s'avère que ceci marche si les différentes parties du système agissent les unes sur les autres à travers quelques forces. Ces forces sont les forces de jauge.

17. De nouveau, l'histoire réelle est plus compliquée que le résumé que j'en fais. En fait, les théories de Yang-Mills ont été découvertes d'abord dans les années 1920 dans le contexte des théories unifiées à dimensions supérieures, mais il semble qu'on les ait oubliées, ce qui a mené à leur redécouverte par Chen Ning Yang, Robert Mills et autres dans les années 1950.
18. Le sujet principal de *The Life of the Cosmos* était les conséquences de ce changement.

5. De l'unification à la superunification

19. Y. Nomura et B. Tweedie, hep-ph/0504246.
20. Courriel de P. Frampton (avec permission).

6. Gravité quantique : la bifurcation

21. A. Einstein, « Approximate Integration of the Field Equations of Gravitation, » *Sitzungsberichte der Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin, 1916), p. 688-696. Pour le début de l'histoire de la gravité quantique, voir John Stachel, introduction et commentaires à Partie V, *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory*, éd. Tian Yu Cao, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.
22. W. Heisenberg and W. Pauli, « Zur Quantendynamik der Wellenfelder », *Zeit. für Physik*, 56, 1-61, 1929, p. 3.
23. M. P. Bronstein, « Quantization of gravitational waves », *Zh. Eksp. Teor. Fix.* 6, 1936, 195. Pour plus d'information sur Bronstein, voir Stachel dans *Conceptual Foundations* et aussi G. Gorelik, « Matvei Bronstein and Quantum Gravity : 70th Anniversary of the Unsolved Problem », *Physics-Uspekhi*, 48, 10, 2005.
24. Richard P. Feynman, *What Do You Care What Other People Think ?*, New York, W. W. Norton, 1988, p. 91.
25. C'est en fait une propriété générique des systèmes tenus par la gravité, comme les étoiles et les galaxies. Tous ces systèmes se refroidissent lorsqu'on y ajoute de l'énergie. Cette différence fondamentale entre les systèmes sans et avec la gravité s'est révélée un obstacle difficile à contourner, dans plusieurs tentatives d'unifier la physique.

Partie II

7. Préparations pour une révolution

1. G. Veneziano, « Construction of a Crossing-Symmetric Regge-Behaved Amplitude for Linearly Rising Regge Trajectories », *Nuovo Cim.*, 57 A, 1968, p. 190-197.
2. www.edge.org/3rd_culture/susskind03/susskind_index.html
3. P. Ramond, « Dual theory for free fermions », *Phys. Rev. D*, 3(10), 1971, p. 2415-2418.
4. Un autre article qui a eu de l'influence, était « Quantum Dynamics of a Massless Relativistic String », par P. Goddard, J. Goldstone, C. Rebbi, and C. Thom, *Nucl. Phys.*, 56, 1973, p. 109-135.
5. J. Scherk and J. H. Schwarz, « Dual Models for Non-Hadrons », *Nuc. Phys.* B, 81 (1), 1974, p. 118-144.
6. T. Yoneya, « Connection of Dual Models to Electrodynamics and Gravi-dynamics, » *Prog. Theor. Phys.*, 51 (6), 1974, p. 1907-1920.

8. La première révolution des supercordes

7. J. H. Schwarz, entretien avec Sara Lippincott, 21 et 26 juillet 2000, http://oralhistories.library.caltech.edu/116/01/Schwarz_OHO.pdf.
8. M. B. Green and J. H. Schwarz, « Anomaly Cancellations in Supersymmetric $D = 10$ Gauge Theory and Superstring Theory », *Phys. Lett. B*, 149 (1-3), 1984, p. 117-122.
9. Entretien avec Schwartz, *ibid*.
10. Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1962. Tr. fr. : *La Structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, 1999.
11. S. Mandelstam, « The N-loop String Amplitude – Explicit Formulas, Finiteness and Absence of Ambiguities », *Phys. Lett. B*, 277 (1-2), 1992, p. 82-88.
12. P. Candelas *et al.*, « Vacuum Configurations for Superstrings », *Nuc. Phys. B*, 258 (1), 1985, p. 46-74.
13. A. Strominger, « Superstrings with Torsion », *Nuclear Physics B*, 274 (2), 1986, p. 253-284.
14. P. C. W. Davies et Julian Brown (éd.), *Superstrings : A Theory of Everything*, Cambridge Univ. Press, 1988, p. 194-95.
15. Sheldon L. Glashow et Ben Bova, *Interactions : A Journey Through the Mind of a Particle Physicist*, New York, Warner Books, 1988, p. 25.
16. L. Smolin, « Did the Universe Evolve », *Class. Quantum Grav.*, 9 (1), 1992, p. 173-191.

9. La révolution numéro deux

17. E. Witten, « String Theory Dynamics in Various Dimensions », hep-th/9503124 ; *Nucl. Phys. B*, 443, 1995, p. 85-126.
18. C. M. Hull and P. K. Townsend, « Unity of Superstring Dualities », hep-th/9410167 ; *Nucl. Phys. B*, 438, 1994, p. 109-137.
19. J. Polchinski, « Dirichlet Branes and Ramond-Ramond Charges », *Phys. Rev. Lett.*, 75 (26), 1995, p. 4724-4727.

20. J. Maldacena, « The Large–N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity », hep-th/9711200 ; *Adv. Theor. Math. Phys.*, 2 : 231 –52 (1998) ; *Int. J. Theor. Phys.*, 38, 1999, p. 1113-1133.
21. A. M. Polyakov, « A Few Projects in String Theory », hep-th/9304146.
22. B. de Wit, J. Hoppe, and H. Nicolai, « On the Quantum-Mechanics of Supermembranes », *Nuc. Phys. B*, 305 (4), 1988, p. 545-581.
23. T. Banks, W. Fischler, S. Shenker, and L. Susskind, « M-Theory as a Matrix Model : A Conjecture » *Phys. Rev. D*, 55 (8), 1997, p. 5112-5128.

10. Une Théorie du Tout ce qu'on veut

24. Les observations des supernovae ont été faites par Saul Perlmutter et ses collaborateurs à Lawrence Berkeley Laboratory et Robert Kirschner et ses collègues de High-Z Supernova Search Team.
25. E. Witten, « Quantum Gravity in de Sitter Space », hep-th/0106109. Witten continue : « Cette dernière affirmation n'est pas très surprenante étant donné le théorème no-go classique. Puisque, en vue des problèmes habituels de stabilisation des modules, il est difficile d'obtenir l'espace de Sitter d'une façon fiable au niveau quantique, étant donné qu'il n'apparaît pas classiquement ».
26. S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde et S. Trivedi, « De Sitter Vacua in String Theory », hep-th/0301240.
27. Voir, par exemple, T. Hertog, G. T. Horowitz et K. Maeda « Negative Energy Density in Calabi-Yau Compactifications », hep-th/0304199.

11. La solution anthropique

28. L. Susskind, « The Anthropic Landscape of String Theory », hep-th/0302219.
29. S. Weinberg, « Anthropic Bound on the Cosmological Constant », *Phys. Rev. Lett.*, 59 (22), 1987, p. 2607-2610.
30. L. Smolin, « Did the Universe Evolve », *Class. Quantum Grav.*, 9 (1), 1992, p. 173-191.
31. S. Weinberg, « Living in the Multiverse », hep-th/0511037.
32. Cité dans un article panoramique récent dans *Seed Magazine* sur les relations entre le principe anthropique et la prolifération des théories des cordes ; www.seedmagazine.com/news/2005/12/surveying_the_landscape.php
33. E. J. Copeland, R. C. Myers et J. Polchinski, « Cosmic F- and D-Strings », *Jour. High Energy Phys.*, Art. n° 013, juin 2004.
34. M. Sazhin *et al.*, « CSL-1 : Chance Projection Effect or Serendipitous Discovery of a Gravitational Lens Induced by a Cosmic String ? » *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 343, 2003, p. 353-359.
35. N. Arkani-Hamed, G. Dvali et S. Dimopoulos, « The Hierarchy Problem and New Dimensions at a Millimeter », *Phys. Lett. B*, 429, 1998, p. 263-272.
36. L. Randall and R. Sundrum, « An Alternative to Compactification », hep-th/9906064 ; *Phys. Rev. Lett.*, 83, 1999, p. 4690-4693.

12. Ce que la théorie des cordes explique

37. En termes techniques, la supersymétrie implique qu'il existe un champ de Killing de genre lumière ou temps, sur la géométrie spatiotemporelle. Ceci implique à son tour l'existence d'une symétrie dans le temps, parce que (dans le langage technique) l'algèbre de la supersymétrie se ferme sur le hamiltonien. Une autre façon de le dire est que la supersymétrie a besoin d'un spineur de Killing, qui implique un vecteur de Killing nul ou de genre temps.
38. E. D'Hoker et D. H. Phong, *Phys. Lett. B.*, 529:241-55 (2002), hep-th/0110247.
39. D. Friedan, « A Tentative Theory of Large Distance Physics », hep-th/0204131.
40. D. Karabali, C. Kim et V. P. Nair, *Phys. Lett. B.*, 434:103-9 (1998) ; hep-th/98044132 ; R. G. Leigh, D. Minic et A. Yelnikov, hep-th/0604060. Pour l'application aux 3+1 dimensions, voir L. Freidel, hepth/0604185.
41. Très récemment ces nouvelles techniques ont aussi été appliquées – avec succès à la chromodynamique quantique dans le cas réaliste du monde à trois dimensions spatiales.
42. Dans *The Road to Reality* (2005), Roger Penrose avance que la plupart des espaces compactifiés, où se mettent en boules les dimensions supérieures, collapseront rapidement en singularités. Pour le prouver, il applique aux fonds spatiotemporels de ces théories des cordes, les théorèmes qu'il a développés avec Hawking, démontrant que la relativité générale prédit les singularités dans les solutions cosmologiques. Autant que je sache, les arguments de Penrose sont valides. Ils tiennent seulement au niveau classique d'approximation, mais c'est la seule approximation où l'on peut étudier l'évolution temporelle des fonds spatiotemporels en théorie des cordes. Par conséquent, le résultat de Penrose est aussi fiable que les arguments qui persuadent les théoriciens des cordes de l'existence du paysage des théories des cordes.

    Cité dans Amanda Gefter, « Is String Theory in Trouble ? » *New Scientist*, 17 décembre 2005.

Partie III

13. Les surprises du monde réel

1. Il arrive souvent que les résultats expérimentaux surprenants ne soient pas confirmés lorsque les autres expérimentateurs répètent l'expérience. Cela ne veut pas dire que quelqu'un soit malhonnête. Les expériences à la frontière du possible sont presque toujours difficiles à répliquer, et il y est typiquement difficile de séparer le bruit du signal qui a un sens. Souvent, plusieurs années passent et beaucoup de tentatives menées par des chercheurs différents échouent avant qu'on comprenne et élimine toutes les sources d'erreur dans les expériences d'un type nouveau.
2. Exprimé en termes de R, la constante cosmologique égale $1/R^2$.
3. K. Land and J. Magueijo, « Examination of Evidence for a Preferred Axis in the Cosmic Radiation Anisotropy », *Phys. Rev. Lett.*, 95, 071301, 2005.
4. *Ibid.*
5. M. Milgrom, « A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis », *Astrophys. Jour.*, 270 (2), 1983, p. 365-389.

6. Plus d'information sur MOND et les données qui le soutiennent, plus les références, sont disponibles sur http://www.astro.umd.edu/~ssm/mond.
7. J. D. Anderson *et al.*, « Study of the Anomalous Acceleration of Pioneer 10 and 11 », gr-qc/0104064.
8. M. T. Murphy *et al.*, « Further Evidence for a Variable Fine Structure Constant from Keck/HIRES QSO Absorption Spectra », *Mon. Not. Roy. Ast. Soc.*, 345, 2003, p. 609-638.
9. Voir, par exemple, E. Peik *et al.*, « Limit on the Present Temporal Variation of the Fine Structure Constant », *Phys. Rev. Lett.*, 93 (17), 170801, 2004 et R. Srianand *et al.*, « Limits on the Time Variation of the Electromagnetic Fine Structure Constant in the Low Energy Limit from Absorption Lines in the Spectra of Distant Quasars », *Phys. Rev. Lett.*, 92 (12), 121302, 2004.
10. K. Greisen, « End to the Cosmic-Ray Spectrum ? » *Phys. Rev. Lett.*, 16 (17), 1966, p. 748-750 et G. T. Zatsepin et V. A. Kuzmin, « Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays », JETP Letters, 4, 1966, p. 78-80.
11. S. Coleman et S. L. Glashow, « Cosmic Ray and Neutrino Tests of Special Relativity », *Phys. Rev. B*, 405, 1997, p. 249-252 ; Coleman et Glashow, « Evading the GZK Cosmic-Ray Cutoff », hep-ph/9808446.

14. Un avantage à tirer d'Einstein

12. G. Amelino-Camelia, « Testable Scenario for Relativity with Minimum Length », hep-th/0012238.
13. João Magueijo, *Faster Than the Speed of Light : The Story of a Scientific Speculation*, New York, Perseus Books, 2003. Tr. fr. : *Plus vite que la lumière*, Dunod, 2003.
14. Vladimir Fock, *The Theory of Space, Time, and Gravitation*, London, Pergamon Press, 1959.
15. L. Friedel, J. Kowalski-Glikman et L. Smolin, « 2 + 1 Gravity and Doubly Special Relativity », *Phys. Rev. D*, 69, 044001, 2004.
16. E. Livine et L. Friedel, « Ponzano-Regge Model Revisited III : Feynman Diagrams and Effective Field Theory », hep-th/0502106 ; *Class. Quant. Grav.*, 23, 2006, p. 2021-2062.
17. Florian Girelli et Etera R. Livine, « Physics of Deformed Special Relativity, » gr-qc/0412079.

15. La physique après la théorie des cordes

18. A. Ashtekar, « New Variables for Classical and Quantum Gravity », *Phys. Rev. Lett.*, 57 (18), 1986, p. 2244-2247.
19. http://online.kitp.ucsb.edu/online/kitp25/witten/oh/10.html
20. Cela n'a pas toujours été l'opinion courante. Il faut remercie Roger Penrose, Rafael Sorkin, Fay Dowker et Fotini Markopoulou d'avoir souligné le rôle primordial de la causalité.
21. Voir, par exemple, R. Loll, J. Ambjørn et J. Jurkiewicz, « The Universe from Scratch », hep-th/0509010.
22. Voir, par exemple, Alain Connes, *Noncommutative Geometry*, San Diego, Academic Press, 1994. Original en français : *Géométrie non-commutative*, Dunod, 2005.
23. O. Dreyer, « Background-Independent Quantum Field Theory and the Cosmological Constant Problem », hep-th/0409048.

24. Voir, par exemple, C. Rovelli, « Graviton Propagator from Background-Independent Quantum Gravity », gr-qc/0508124.
25. S. Hofmann et O. Winkler, « The Spectrum of Fluctuations in Singularity-free Inflationary Quantum Cosmology », astro-ph/0411124.
26. F. Markopoulou, « Towards Gravity From the Quantum », hep-th/0604120.
27. S. O. Bilson-Thompson, « A Topological Model of Composite Preons », hep-ph/0503213.
28. S. O. Bilson-Thompson, F. Markopoulou et L. Smolin, « Quantum Gravity and the Standard Model », hep-th/0603022.
29. Les enregistrements audios des discussions sont disponibles à l'adresse www.perimeterinstitute.ca, sous Conferences, Evolving Laws, 2005.

Partie IV

16. Comment combattre la sociologie ?

1. www.cosmicvariance.com/2005/11/18/a-particle-physicists-perspective.
2. Entrée anonyme sur http://groups.google.com/group/sci.physics.strings/ par String Theorist, 9 octobre 2004.
3. *Guardian Unlimited*, 20 janvier 2005.
4. À mes articles qui mettaient en question tel ou tel autre résultat de la théorie des cordes, j'ai reçu trois réponses dans lesquelles le correspondant se référait à une communauté théorique « forte ». Comme dans : « Tandis que la finitude perturbative (de la conjecture de Maldacena, ou S-dualité) pourrait ne pas avoir été démontrée, personne dans la communauté forte de la théorie des cordes ne croit qu'elle pourrait être fausse. » Une fois, c'est peut-être une coïncidence ; trois fois, c'est un lapsus freudien classique. Quelle part de la sociologie de la théorie des cordes se réduit-elle tout simplement à cette pulsion humaine, ô combien reconnaissable, d'appartenir au groupe le plus fort ?
5. S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde et S. Trivedi, « De Sitter Vacua in String Theory », hep-th/0301240.
6. http://groups.google.com/group/sci.physics.strings/, 6 avril 2004.
7. L. Smolin, « Did the Universe Evolve ? » *Class, Quant. Grav.*, 9, 1992, p. 173-191.
8. Communication personnelle.
9. Michael Duff, *Physics World*, décembre 2005.
10. www.damtp.cam.ac.uk/user/gr/public/qg_ss.html
11. Pourtant je suis content qu'il soit aussi facile de trouver sur le web les introductions à la théorie des cordes qui ne font pas des affirmations déformées ou exagérées. En voici quelques exemples :
    http://tena4.vub.ac.be/beyondstringtheory/index.html,
    www.sukidog.com/jpierre/strings/, http://en.wikipedia.org/wiki/M-theory
12. S. Mandelstam, « The N-loop String Amplitude – Explicit Formulas, Finiteness and Absence of Ambiguities », *Phys. Lett. B*, 277 (1-2), 1992, p. 82-88.
13. Voici quelques exemples : J. Barbon, hep-th/0404188, *Eur. Phys. J.*, C33:S67-S74 (2004) ; S. Foerste, hep-th/011005, *Fortsch. Phys.*, 50:225403 (2002) ; S. B. Giddings, hep-th/0501080 ; I. Antoniadis et G. Ovarlez, hep-th/9212006. L'exemple rare d'un article

pourvu d'une discussion prudente et correcte (pour l'époque) du problème de finitude est L. Alvarez-Gaume et M. A. Vazquez-Mozo, hep-th/9212006.

14. Il s'agit d'un article par Andrei Marshakov, *Phys. Usp.*, 45:915-54 (2002), hep-th/0212114. Je m'excuse pour le langage technique, mais le lecteur comprendra peut-être l'essentiel :

> Malheureusement, la corde à dix dimensions, qui prétend réussir au mieux parmi les modèles des cordes existants, est en général rigoureusement définie seulement au niveau de l'arbre et à une boucle. À partir des corrections à deux boucles aux amplitudes de diffusion, tous les termes en théorie perturbative des supercordes ne sont vraiment pas définis. Cela vient des problèmes bien connus avec la supergéométrie ou l'intégration sur les « superpartenaires » des modules des structures complexes. Contrairement au cas bosonique, où la mesure d'intégration est fixée par le théorème de Bélavine-Knizhnik, la définition de la mesure d'intégration sur les supermodules (ou, plus rigoureusement, les modules impairs des structures supercomplexes), elle, reste toujours un problème non résolu [88, 22]. Les espaces de modules des structures complexes des surfaces de Riemann sont non compacts, et l'intégration sur de pareils espaces nécessite une attention particulière et des définitions supplémentaires. Dans le cas bosonique, quand les intégrales sur les espaces de modules divergent, le résultat de l'intégration dans (3.14) est défini seulement à quelques « termes limites » près (les contributions des surfaces de Riemann dégénérées ou des surfaces de genre inférieur (avec moins d'anses)). Dans le cas des supercordes, on rencontre des problèmes plus sérieux, car la notion même de « frontière d'un espace de module » n'est pas définie. En effet, l'intégrale sur les variables impaires de Grassmann ne « sait » pas ce qu'est le terme limite. C'est la raison fondamentale pour laquelle la mesure d'intégration dans le cas d'une corde fermionique n'est pas bien définie et elle dépend du « choix de jauge » ou du choix particulier des « modes nuls » dans l'action (3.23). Pour les contributions à deux boucles, on peut résoudre ce problème « empiriquement » (voir [88, 22]), mais en général la théorie des perturbations pour les supercordes n'est pas une entité bien définie mathématiquement. En plus, les problèmes ici n'appartiennent pas exclusivement au formalisme considéré : les mêmes obstacles apparaissent dans l'approche moins géométrique de Green et Schwarz [91].

15. Voici un extrait de la réponse de Mandelstam, datée le 5 novembre 2003 :

> Vous demandez si je suis d'accord avec l'affirmation que la conjecture de la finitude des amplitudes à plusieurs boucles reste une question ouverte. Si par « ouverte » vous entendez dire qu'il n'y a pas de preuve rigoureuse du contraire, je ne le disputerais pas ; j'ai mentionné dans la lettre précédente que je ne dirais pas que tout le développement est rigoureux, et pour les théories avec les cordes ouvertes, on peut soutenir que des éléments de ce développement n'ont pas été élaborés, même sans rigueur. Pourtant, je crois que la majorité des physiciens prendront le mot « ouverte » comme signifiant quelque chose de plus que l'absence de rigueur dans les preuves du contraire ; sinon, il y aurait eu beaucoup de questions ouvertes en physique ! Il semble que le mot « conjecture » implique que la question des amplitudes à plusieurs boucles n'aurait pas vraiment été étudiée et que la croyance qu'elles sont finitaires serait fondée sur les diagrammes à une boucle. Ceci n'est certainement pas le cas. On sait que les divergences ne peuvent surgir que là où l'espace de module dégénère. (C'est rigoureux.) On sait comment un espace de module peut dégénérer, et on a étudié les régions de dégénération. Il est sans doute possible de pointer le manque de rigueur de certains points de cette étude. J'ai formulé la position telle que je le comprends ; probablement, on ne peut pas la résumer par les phrases comme « la finitude a été prouvée à tous les ordres » et « la finitude au-delà d'une boucle a été seulement conjecturée ».

16. G. T. Horowitz et J. Polchinski, « Gauge/gravity duality », gr-qc/0602037. À paraître dans *Towards quantum gravity*, éd. Daniele Oriti, Cambridge University Press.
17. http://golem.ph.utexas.edu/~distler/blog/archives/000404.html
18. Irving Janis, Victims of Groupthink : *A Psychological Study of Foreign-Policy Decisions and Fiascoes*, Boston, Houghton Miffiin, 1972, p. 9. Le phénomène est bien sûr beaucoup plus ancien. John Kenneth Galbraith, un éminent économiste, l'a appelé « une sagesse conventionnelle ». Par cela, il entendait « les opinions auxquelles, quoique pas nécessairement bien fondées, les riches et les puissants adhèrent en nombre si grand qu'uniquement les imprudents et les idiots mettront leurs carrières en danger en se montrant en désaccord avec elles » (tirée d'une revue du livre parue dans *Financial Times*, 12 août 2004).
19. Irving Janis, *Crucial Decisions : Leadership in Policymaking and Crisis Management*, New York, Free Press, 1989, p. 60.
20. http://oregonstate.edu/instruct/theory/grpthink.html
21. Un autre exemple est la preuve erronée de la non-existence des variables cachées en théorie quantique, publiée par John von Neumann dans les années 1930, qui a été beaucoup cité pendant trois décennies avant que le théoricien quantique David Bohm ne trouve une théorie à variables cachées.

17. Qu'est-ce que la science ?

22. Voir Paul Feyerabend, *Killing Time : The Autobiography of Paul Feyerabend*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1996. Tr. fr. : *Tuer le temps*, Seuil, 1998.
23. Voir, par exemple, Karl Popper, *The Logic of Scientific Discovery*, New York, Routledge, 2002. Tr. fr. : *La Logique de la découverte scientifique*, Payot, 1973.
24. Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1962. Tr. fr. : *La Structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, 1999.
25. Imre Lakatos, *Proofs and Refutations*, Cambridge, U.K., Cambridge Univ. Press, 1976. Tr. fr. : *Preuves et réfutations : essai sur la logique de la découverte mathématique*, Hermann, 1984.
26. En défendant la validité du principe anthropique, Leonard Susskind a baptisé ses critiques du nom de *Popperazzi*, car ils évoquent le besoin d'un moyen de falsification quelconque. C'est une chose de prendre en compte les objections à Popper soutenant que la falsification n'est qu'une partie du fonctionnement la science, c'en est une autre, bien différente, de préconiser l'acceptation pour des raisons scientifiques d'une théorie qui ne fait pas de prédictions uniques ni spécifiques qui pourraient la falsifier ou la confirmer. À cet égard, je suis fier d'être un *Popperazzo*.
27. Alexander Marshack, *The Roots of Civilization : The Cognitive Beginnings of Man's First Art, Symbol, and Notation*, New York, McGraw-Hill, 1972.
28. D. H. Wolpert and W. G. Macready, *No Free Lunch Theorems for Search*, Technical Report, Santa Fe Institute, SFI-TR-95-02-010.
29. Richard P. Feynman, « What is Science », *The Physics Teacher*, septembre 1969.

18. Les visionnaires et les artisans

30. Cité dans Simon Singh, « Even Einstein Had His Off Days », *New York Times*, 2 janvier 2005.
31. Voir, par exemple, Mara Beller, *Quantum Dialogue : The Making of a Revolution*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1999.
32. Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1962. Tr. fr. : *La Structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, 1999.
33. A. Einstein à R. A. Thorton, lettre non publiée, datée du 7 décembre 1944 (EA 6-574). Archives Einstein, Université Hébraïque, Jérusalem. Cité dans Don Howard, « Albert Einstein as a Philosopher of Science », *Physics Today*, décembre 2005.
34. T. Jacobson et L. Smolin, « Nonperturbative Quantum Geometries », *Nucl. Phys. B*, 299, 1988, p. 295-345.
35. Voir, par exemple, L. Crane, « Clock and Category : Is Quantum Gravity Algebraic ? » gr-qc/9504038 ; *J. Math. Phys.*, 36, 1995, p. 6180-6193.
36. Voir, par exemple, F. Markopoulou, « An Insider's Guide to Quantum Causal Histories », hep-th/9912137 ; *Nucl. Phys. B*, Proc. Supp., 88 (1), 2000, p. 308-313.
37. Seth Lloyd, *Programming the Universe : A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*, New York, Alfred A. Knopf, 2006.
38. Je dois encore insister sur le fait que je ne parle ici que des personnes ayant une bonne formation, jusqu'au niveau de thèse. Ceci n'est pas une discussion à propos des charlatans ni des gens qui comprennent mal ce qu'est la science.
39. L. Smolin, « On the Nature of Quantum Fluctuations and Their Relation to Gravitation and the Principle of Inertia », *Class. Quant. Grav.*, 3, 1986, p. 347-359.
40. Julian Barbour, *The End of Time : The Next Revolution in Physics*, New York, Oxford Univ. Press, 2001.
41. D. Finkelstein, « Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle », *Phys. Rev.*, 110, 1958, p. 965-967.
42. Antony Valentini, *Pilot-Wave Theory of Physics and Cosmology*, Cambridge, U.K., Cambridge Univ. Press, à paraître.
43. Voici un extrait d'une lettre de la National Science Foundation au physicien James Cushing, de l'université de Notre Dame, en 1995, refusant le soutien à son projet de travailler sur les fondements de la théorie quantique :

> Le sujet en question, la rivalité entre l'interprétation de Copenhague et les interprétations causales [bohmiennes], a été discuté pendant plusieurs années, et la position de quelques membres de la Division des sciences physiques de la NSF consiste à dire que cette question est réglée. L'interprétation causale n'est pas cohérente avec les expériences qui testent les inégalités de Bell. Par conséquent [...] financer [...] un programme de recherche dans ce domaine serait imprudent.

Ce qui est remarquable avec cette lettre est qu'elle contient une erreur élémentaire, car il était bien montré à la date de son écriture que l'interprétation causale est parfaitement cohérente avec les expériences qui testent les inégalités de Bell. En fait, avant de changer de centre d'intérêts pour travailler sur les fondements de la théorie quantique, Cushing a connu beau-

coup de succès en tant que physicien des particules, mais ceci n'a pas empêché la NSF de lui couper son financement.

44. David Deutsch, *Proc. Roy. Soc A.*, 400:97-117 (1985).
45. David Deutsch, *The Fabric of Reality : The Science of Parallel Universes and Its Implications*, London, Penguin, 1997. Traduction française : *L'Étoffe de la réalité*, Paris, Vuibert, 2003.
46. P. W. Shor, « Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer », quant-ph/9502807.
47. A. Valentini, « Extreme Test of Quantum Theory with Black Holes », astro-ph/0412505.
48. Alexander Grothendieck, *Récoltes et Semailles*, 1986, www.grothendieckcircle.org, chapitre 2.

19. Comment la science fonctionne en réalité

49. Il existe une exception regrettable à cela, lorsqu'un professeur effrayé par son reflet plus jeune renonce à garder son esprit ouvert au risque, comme il l'était pendant sa jeunesse, et embrasse le conservatisme scientifique. Rappeler à quelqu'un sa jeunesse est en général une bien mauvaise idée.
50. Voir, par exemple, « A Study on the Status of Women Faculty in Science at MIT », vol. XI, n° 4, mars 1999, disponible en ligne à : http://web.mit.edu/fnl/women/women.html
Plus d'informations sur les questions relatives aux femmes en sciences sont disponibles auprès de l'American Physical Society à l'adresse : www.aps.org/programs/women/index.cfm
51. James Glanz, « Even Without Evidence, String Theory Gains Influence », *New York Times*, 13 mars 2001.
52. Gary Taubes, *Nobel Dreams : Power, Deceit and the Ultimate Experiment*, New York, Random House, 1986, p. 254-255.
53. Isador Singer, entretien publié en ligne sur :
www.abelprisen.no/en/prisvinnere/2004/interview_2004_1.html.
54. Alain Connes, entretien disponible sur : www.ipm.ac.ir/IPM/news/connes-interview.pdf