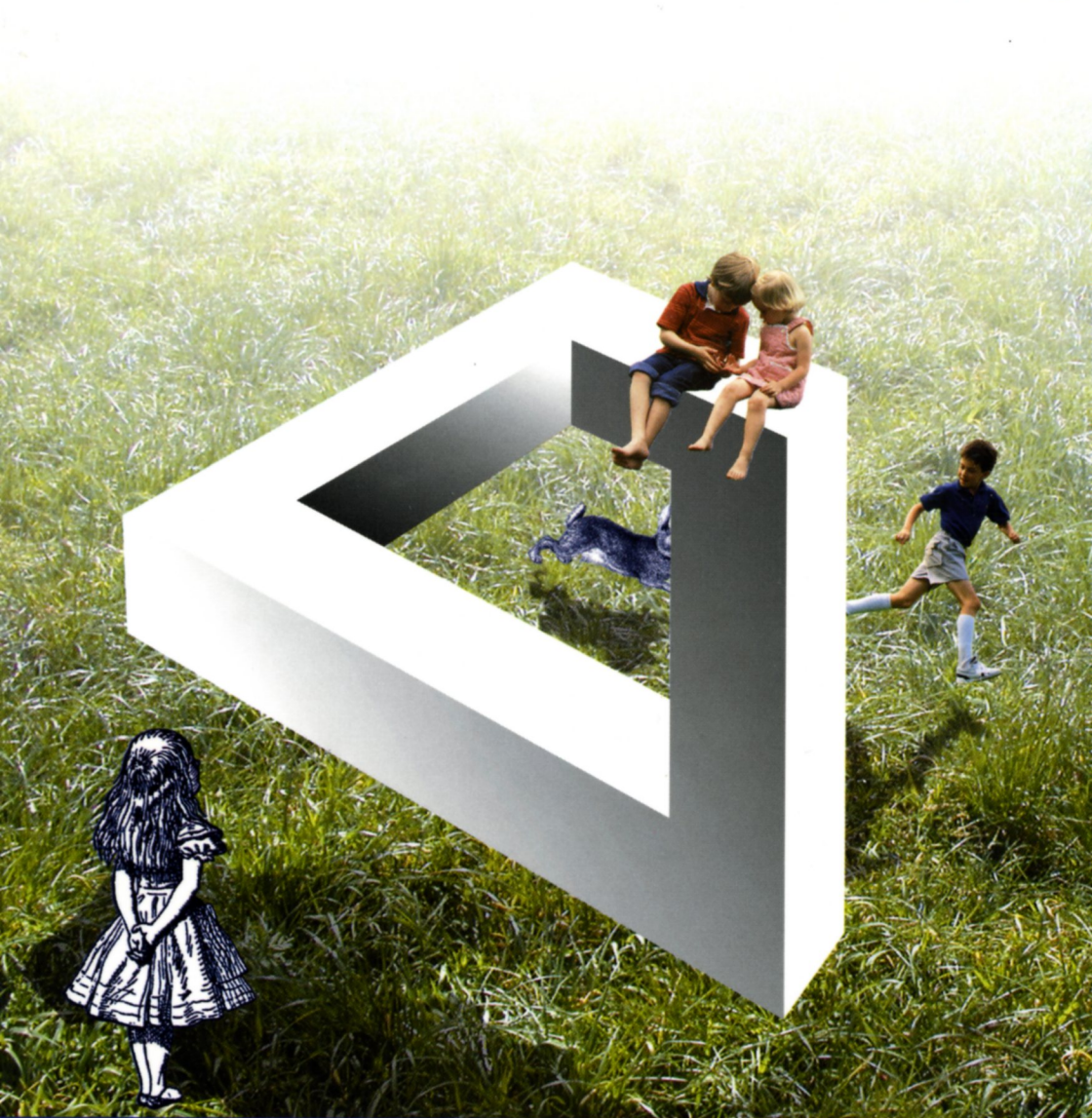


Le réel et ses dimensions



Édité par Gilles Cohen-Tannoudji & Émile Noël

Le réel et ses dimensions

Édité par Gilles Cohen-Tannoudji et Émile Noël

Françoise Balibar
Jean-Philippe Uzan
Pierre Binétruy
Pierre Sonigo
Yves Pomeau
Philippe Coiffet
Pascal Picq



17, avenue du Hoggar
Parc d'activité de Courtabœuf
91944 Les Ulis Cedex A

Huitième rencontre « Physique & interrogations fondamentales »
19 novembre 2003

Illustrations de couverture : Alain Bonaventure, Page B
Couverture réalisée par Valérie Bardiau
Mise en pages : Linéale Production.



ISBN : 2-86883-693-3

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2003

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	
Gilles Cohen-Tannoudji et Émile Noël	5
Le réel a toujours eu quatre dimensions	
Françoise Balibar.....	11
Dimensions et constantes fondamentales	
Jean-Philippe Uzan	25
Les nouvelles dimensions de l'Univers	
Pierre Binétruy	57
Les dimensions du vivant	
Pierre Sonigo	69
Le réel et ses représentations	
Yves Pomeau.....	83
Un vrai-faux lapin dans un champ de carottes	
Philippe Coiffet	95
Le réel des animaux	
Pascal Picq	109
Conclusion.....	129

INTRODUCTION

Que la physique s'intéresse au « réel », cela se discute depuis un certain temps et cela n'est, semble-t-il, pas fini.

À quoi rêvent donc les physiciens ?¹ De l'infiniment grand à l'infiniment petit, comme on dit, ils cherchent les lois qui régissent l'Univers. Aujourd'hui, quatre forces fondamentales ont été mises en évidence, mais leur unification n'est pas encore réalisée. Différentes théories et hypothèses sont en lice.

Le réel serait-il encore plus fondamental ? Depuis l'Antiquité (et sans doute avant) les hommes ont tenté de donner les explications les plus cohérentes possible au fonctionnement du monde. Ils ont d'abord procédé par mythologies, puis l'esprit scientifique a pris le relais, mais les sciences seraient-elles exemptes de mythologies ?

Certes, il existe des recherches dites rationnelles : Richard Feynman², il y a déjà plusieurs décennies, interprétait la nature du monde et du savoir élaboré par les sciences physiques. L'exposé des évolutions dans

1. – Jean-Pierre Pharabod, Bernard Pire, *Le rêve des physiciens*, Paris, Éditions Odile Jacob, collection « Opus Sciences », 1997.

2. – Richard Feynman, *La Nature de la physique*, Paris, Éditions du Seuil, collection « Points Sciences », 1980, (*Messenger Lectures*, Université Cornell, États-Unis, 1964).

ce domaine lui inspirait une méditation encore actuelle sur le caractère de la physique. Si l'on sait que ses conférences datent de 1964, on peut mesurer à quel point ce grand physicien voyait loin : des questions portant sur la gravitation, le rôle des mathématiques en physique, les principes de conservation, la symétrie, la description quantique de la Nature, l'attente de lois nouvelles...

Les « métaphysiciens » s'intéressent eux aussi au « réel ». Ils le considèrent souvent comme une synthèse des synthèses, qu'ils tentent, en rassemblant en colloque mathématiciens, astrophysiciens, philosophes, psychanalystes, théologiens, pour des synthèses magiques et quelquefois floues³.

Mais, au fait, qu'entend-on par réel ? Les dictionnaires sont prolixes concernant cet item : l'adjectif « réel » qualifie quelqu'un ou quelque chose qui existe ou a existé effectivement, et n'est pas seulement une création de l'imagination : authentique, certain. Se dit de ce qui est conforme à ce qu'il doit être ou prétend être : véritable, vrai. Se dit de ce qui n'est pas douteux, peut être visiblement constaté : appréciable, évident, notable, effectif.

En arithmétique, il existe les nombres réels. On trouve même une partie réelle dans les nombres complexes. La géométrie analytique qualifie de réel un ensemble de points qui ont pour coordonnées des nombres réels : droite réelle = droite graduée. En informatique, est réel ce qui est relatif à une variable, dans un programme, pouvant prendre des valeurs numériques non entières. Toujours en informatique, on peut traiter des données en temps réel.

Une monnaie réelle est une monnaie métallique ayant cours. En musique, une note réelle est une note d'une mélodie faisant partie des

3. – Hubert Reeves, Isabelle Stengers, René Thom, Ivar Ekeland, Élie Humbert, Olivier Clément, Michel Cazenave, Marie-Odile Monchicourt, *Approches du réel*, Éditions Le Mail-France Culture, 1986 ; Xavier Audouard, Michel Cassé, Daniel Kipman, Michèle Montrelay, Basarad Nicolescu, Pierre Solié, Dominique Décant, *Le psychanalyste, le physicien et le réel*, Éditions Poiesis-France Culture, 1987.

accords qui l'accompagnent. En sciences politiques, le Pays réel est l'ensemble des individus qui peuvent exprimer leur choix politique, en accord ou désaccord avec le gouvernement en place ; Pays réel s'oppose à Pays légal. En droit ancien, la Taille réelle portait sur les terres roturières et les maisons urbaines (dans le Sud-ouest de la France, en Provence et dans le Languedoc), par opposition à la Taille personnelle. Le droit fiscal connaît l'impôt réel, le contribuable aussi. L'anthropologie sociale a sa parenté réelle et même les télécommunications ont leur Circuit réel (Circuit combinant).

Quant à la philosophie depuis qu'on la nomme ainsi, des anciens Grecs à nos jours, et sa jeune rivale la psychanalyse, c'est tout une bibliothèque qu'il faudrait convoquer, à propos de réel.

La physique, comme le remarquait Feynman, a aussi droit à méditations⁴. Depuis les publications de Bernard d'Espagnat (1979 et 1985), il y a du grain nouveau à moudre et à méditer⁵. Il y a plus d'un demi-siècle, Erwin Schrödinger, non point celui du « chat », mais de *What is life* ?⁶, a initié sa réflexion à partir d'une interrogation épistémologique : « Comment peut-on expliquer à l'aide de la physique et de la chimie les événements qui se produisent *dans l'espace et le temps* dans les limites spatiales d'un organisme vivant ? »⁷ Ce petit livre, qui a suscité beaucoup de vocations parmi les créateurs de la biologie moléculaire, représente, selon les termes de Roger Penrose, « une extraordinaire tentative d'élucidation de quelques-uns des mystères de la vie, par un physicien dont les propres découvertes ont tant fait pour changer notre vision du monde. »

Les entretiens qui font l'objet du présent ouvrage, réalisés avec les intervenants de la huitième rencontre « Physique et Interrogations

4. – Richard Feynman, *op. cit.*

5. – Bernard d'Espagnat, *À la recherche du réel, Le regard d'un physicien*, Paris, Gauthier-Villars, 1979 ; *Une incertaine réalité, le monde quantique, la connaissance et la durée*, Gauthier-Villars, 1985.

6. – Erwin Schrödinger, *Qu'est-ce que la vie ?*, *De la physique à la biologie*, Paris, Éditions du Seuil, collection « Points Sciences », 1986, *What is life*?, Dublin, 1944, Cambridge University Press, 1967.

7. – *Ibid.*, préface d'Antoine Danchin, p. 9.

Fondamentales » organisée, en novembre 2003, par la Société française de physique en partenariat avec la Bibliothèque nationale de France sur le thème « le réel et ses dimensions », apportent modestement leur petite pierre à l'édifice⁸.

Comme leur nom l'indique, ces rencontres abordent les grandes questions qui se posent aux physiciens contemporains dans leurs recherches concernant des entités aussi essentielles que la matière, l'espace, le temps, la lumière ou l'Univers – donc le « réel ». Toutefois, si le réel a bien une réalité, il faut qu'il ait aussi des dimensions, et cette huitième rencontre « physique et interrogations fondamentales » a été consacrée à mieux cerner ce concept.

Au sens premier, géométrique, le concept de dimension caractérise l'espace de représentation de la réalité physique : espace euclidien à trois dimensions de la mécanique classique ; espace-temps à quatre dimensions de la théorie de la relativité ; espaces abstraits à nombres très grands ou infinis de dimensions comme l'espace de phase de la thermodynamique, ou l'espace de Hilbert de la mécanique quantique ; géométrie fractale à nombre fractionnaire de dimensions représentant les objets auto-similaires. Selon une autre acception, strictement physique celle-là, de la notion de dimension, le « contenu dimensionnel » caractérise les proportions dans lesquelles interviennent les quantités physiques fondamentales (masse, longueur, durée) dans la définition des quantités dérivées (par exemple, une vitesse a le contenu dimensionnel du quotient d'une longueur par une durée). Dans les deux cas, le concept de dimension est l'objet de nouveaux questionnements dans les développements les plus récents de la physique : l'espace a-t-il, et a-t-il toujours eu trois dimensions ? Et au fait, pourquoi trois ? Des constantes universelles telles que la vitesse de la lumière ou la constante de gravitation sont-elles vraiment constantes, alors que certaines observations suggèrent qu'elles auraient subi une lente variation sur des échelles de temps cosmologiques ?

8. – *Ibid.*, avant-propos, p. 5.

Telles sont quelques-unes des interrogations, en même temps que d'autres liées au sens figuré de la notion de dimension qui se réfère à l'appréhension, la compréhension ou la représentation du réel, ou à son intervention en biologie, en robotique, en éthologie ou en esthétique, qui sont abordées lors de la rencontre et qui font l'objet de cet ouvrage. Les contributions ont été établies à partir des enregistrements réalisés par Émile Noël, et diffusés par la Radio Suisse Romande (Espace 2 – Anne-Marie Rhyn).

Gilles Cohen-Tannoudji
Émile Noël

LE RÉEL A TOUJOURS EU QUATRE DIMENSIONS

Françoise Balibar*

« Le réel a toujours eu quatre dimensions. » Sans doute faut-il s'entendre sur ce que l'on place sous le mot. Quoi qu'il en soit, et sous réserve de revenir sur cette question, on peut supposer que le dit réel n'a pas attendu que l'on s'en aperçoive pour se fonder sur ces fameuses quatre dimensions.

En effet, sous réserve de préciser ce que l'on entend par réel, on peut dire que l'on n'a pas attendu l'avènement de la relativité restreinte, en 1905, pour s'apercevoir que la description du réel faisait intervenir, outre les trois dimensions d'espace, une dimension temporelle. Le temps a depuis toujours constitué, sinon l'une des dimensions du réel, du moins une des variables intervenant dans sa description. Quand je dis « depuis toujours », j'entends depuis les débuts de la physique moderne, c'est-à-dire depuis que Galilée a fondé la physique telle que nous la connaissons, en énonçant le principe de relativité. On peut en effet montrer – mais je ne le ferai pas ici car cela nous entraînerait trop

* Professeur émérite de physique, Université Paris VII Denis Diderot.

loin – que l'énoncé du principe de relativité marque l'entrée dans le champ de la physique de la variable « temps », par l'intermédiaire de la notion de « vitesse instantanée ». On a peine à croire aujourd'hui que l'invention de la vitesse instantanée ait pu constituer une avancée majeure dans le développement de la pensée occidentale. Pourtant l'idée que l'on puisse *définir* la vitesse d'un mobile à *chaque instant* n'a rien de naturel en soi. Certes aujourd'hui, c'est ce type de vitesse qui nous semble naturelle : c'est celle que l'on lit sur le cadran du compteur de vitesse instantanée dont sont équipées les voitures automobiles. Toutefois, il a fallu attendre Galilée pour que l'on sache faire la différence entre cette vitesse définie à chaque instant (et pour cette raison, dite « instantanée ») et cette autre définition de la vitesse qui, à l'époque de Galilée, était la seule connue : le rapport entre la distance parcourue par un mobile et la durée du temps mis à la parcourir. À cette vitesse, nous ajoutons aujourd'hui le qualificatif de « moyenne » car, comme chacun sait, ce n'est pas parce qu'une voiture a parcouru 1 000 kilomètres en 10 heures que l'aiguille du compteur est restée fixée sur le 100 (sous-entendu : kilomètres par heure) pendant tout le temps du parcours. La position de l'aiguille a varié « au cours du temps », indiquant des variations de la vitesse instantanée que masque la notion de vitesse moyenne, tout en donnant quand même une information sur la manière dont s'est effectué le trajet.

Plus précisément, et dit en termes plus savants, Galilée a eu l'idée de définir, à *chaque instant*, le rapport entre l'accroissement, aussi petit soit-il, de la distance parcourue par un mobile à partir de cet instant et la durée, elle-même très petite, nécessaire à cet accroissement. En somme, partant de la vitesse telle qu'elle était définie à son époque pour des accroissements de la distance et de la durée finis, il a eu l'idée (que personne n'avait eue aussi clairement avant lui) de généraliser cette définition à la limite des accroissements très petits, infiniment petits. Galilée n'utilise pas le terme « infiniment petit ». Pour que la notion d'infiniment petit acquière un statut mathématique, il faudra attendre la génération suivante, celle d'Isaac Newton et surtout de Gottfried Leibniz, qui introduira la notion de différentielle et de rapport de deux

différentielles. La vitesse (instantanée, la seule susceptible d'une définition mathématique) sera alors définie comme la « dérivée » de l'espace parcouru par rapport au temps. Cela fait apparaître d'une part que le temps est la véritable variable en fonction de laquelle il est possible de décrire le mouvement et, d'autre part, que le temps, dont les accroissements peuvent être combinés à ceux de la distance pour former la vitesse, est de même « nature », de même farine si j'ose dire, que l'espace. Ce qui, quand on y réfléchit bien, n'a rien qui aille de soi. Ce n'est que parce que nous suçons la notion de vitesse instantanée au biberon, assis à l'arrière de la voiture familiale – autrement dit, parce qu'un objet technologique simple, le compteur de vitesse automobile, matérialise pour nous cette idée – que nous la trouvons, elle aussi, « simple ». Elle ne l'est pas du tout.

Cette vitesse instantanée est sans cesse fluctuante. Elle change à la moindre fraction de seconde.

Certes, de cette « distance temporelle », très petite, différentielle, l'enfant (pas plus que le conducteur adulte) n'a une idée claire, c'est-à-dire mathématique. Seulement, à regarder bouger l'aiguille de l'indicateur de vitesse, la vitesse instantanée nous est devenue d'une certaine façon plus familière que la vitesse moyenne. Sous la banalité d'une aiguille qui bouge, se cache une conceptualisation qui n'a été explicitée qu'au XVII^e siècle.

Il peut paraître étonnant que Galilée, l'homme qui met en évidence ces phénomènes, ne les conceptualise pas lui non plus. Il n'en a finalement pas une conscience très claire.

Il ne pouvait pas en avoir la conscience théorique que nous en avons aujourd'hui. Nous arrivons après Leibniz, après Newton, après tout ce qui s'est passé depuis et le développement du calcul algébrique. Toutefois, Galilée en a certainement eu une conscience plus physique,

plus profonde que nous. En effet, comme c'est souvent le cas, la possibilité de disposer d'un « outil mathématique », comme l'on dit, possibilité absolument nécessaire si l'on veut faire œuvre de physicien moderne, masque la véritable nature des choses. L'utilisation des mathématiques comme outil de pensée rend, si l'on peut dire, les choses *trop faciles* à comprendre. L'exemple historique le plus célèbre à cet égard est celui des contemporains de Michael Faraday, au milieu du XIX^e siècle, qui, aveuglés par l'élégance et l'efficacité de la théorie de l'attraction universelle, formulée en termes mathématiques simples et clairs par Newton, n'ont pas pris garde aux difficultés conceptuelles de cette théorie. Il fallait la fraîcheur d'esprit de Faraday, qui n'avait pas fait des études poussées, pour ressentir, au sens fort du terme, ce qui n'allait pas dans cette théorie – à savoir qu'il est impossible qu'un objet matériel agisse là où il n'est pas ; ce que Faraday a corrigé en inventant le concept de « champ », dont l'importance n'est pas suffisamment soulignée par les essais de vulgarisation, encore aujourd'hui. Ce qui est étonnant, dans cette histoire, c'est que Newton lui-même avait mis ses lecteurs en garde contre l'idée d'une action à distance, dont il disait ne pas connaître le mécanisme. Cependant, les développements mathématiques que connut sa théorie pendant tout le XVIII^e siècle suffirent à masquer aux yeux des physiciens de métier, et à leur faire oublier, l'inquiétude initiale de Newton. Inquiétude que les calculs mathématiques ne pouvaient pas apaiser sans l'introduction d'un nouveau concept, celui de « champ », mathématisé par la suite par James Maxwell, élevé à Cambridge.

A-t-on une idée de la façon dont la conceptualisation a évolué ? En partant de Galilée précisément, comment les choses se sont-elles précisées ?

Cela ne s'est évidemment pas passé d'un seul coup. On peut dire qu'en 1905, l'article d'Albert Einstein, fondateur de la relativité apparut comme une solution à un problème qui n'a fait qu'enfler au cours des siècles. Comme si la physique avait couvé une maladie qui s'était développée lentement, subrepticement, jusqu'au moment où la gêne étant

devenue intolérable, seul le bistouri du chirurgien avait pu apporter un soulagement.

En l'occurrence, le problème qui a insidieusement gangrené le corps de la physique n'a, en apparence, pas grand-chose à voir avec le temps et le nombre de dimensions du réel ; il s'agit du problème de l'unité de la physique. Le principe de la relativité énonçait que les descriptions du réel que font deux « observateurs » en translation uniforme l'un par rapport à l'autre, en dépit du fait qu'elles ne sont pas identiques, sont néanmoins équivalentes, en ce sens qu'il est possible de déduire mathématiquement l'une de l'autre – ce qui assure aux deux descriptions équivalentes un caractère objectif. La physique a alors commencé par se développer en tant que science du mouvement, ou science des mobiles assimilés à des ensembles de corpuscules – ce que l'on a appelé, et continue d'appeler, *la mécanique*, dont les lois doivent toutes, *a priori*, satisfaire au principe de relativité. Parallèlement à cette science de la matière et du mouvement, fondée sur le principe de relativité de Galilée, s'était développée une théorie physique de la lumière, fondée sur des concepts totalement différents de ceux utilisés en mécanique, qui échappaient, apparemment du moins, à la législation du principe de relativité. Pour donner une idée de l'éloignement, pour ne pas dire l'incommensurabilité, des deux théories, celle de la matière et celle de la lumière, il suffit de considérer que les concepts de la mécanique relèvent du discontinu (points matériels, trajectoires, etc.), alors que ceux de la théorie de la lumière relèvent du continu (ondes, propagation dans tout l'espace, etc.). Ces deux théories ne peuvent guère être rendues compatibles : il est impossible de construire des entités véritablement continues en juxtaposant simplement des entités discontinues (le sol du Sahara vu du ciel peut paraître continu, mais on sait bien qu'il n'en est rien puisqu'il est constitué d'une juxtaposition de grains de sable).

Cette antinomie entre théories de la lumière et de la matière n'a cessé de grandir à mesure que l'une et l'autre se développaient, jusqu'à devenir, pour les physiciens de l'époque (la fin du XIX^e siècle), une

véritable épine dans leur chair. Épine qu'Einstein a extirpée en 1905 en trouvant le moyen de rendre les deux théories compatibles. De fait, l'intervention chirurgicale d'Einstein n'a pas porté (du moins dans un premier temps) sur le point d'incompatibilité signalé il y a un instant (il est impossible de faire du continu à partir d'éléments discontinus), mais sur un autre point (dont on se doute qu'il est lié au premier, bien que cela n'ait rien d'évident) : le statut à donner à une certaine vitesse, celle de la lumière. Avant de préciser ce dont il s'agit, remarquons que la physique qui est née de l'irruption du temps, (*via* le concept de vitesse instantanée), en tant que « dimension » nécessaire à la description du réel, a connu sa principale refonte encore à propos d'une vitesse, et donc du statut du temps en tant que dimension du réel.

Examinons ce point d'un peu plus près. Au tournant du ^{xx}e siècle, l'incompatibilité de la mécanique et de la théorie de la lumière se faisait particulièrement sentir lorsqu'on se demandait si la théorie de la lumière ne devrait pas, elle aussi, tout comme la théorie de la matière, obéir au principe de relativité. La question peut sembler saugrenue, tant l'idée que lumière et matière sont totalement étrangères l'une à l'autre, l'une impalpable, l'autre tangible, nous est naturelle. Toutefois, on voit aisément que cette position n'est pas tenable – ne serait-ce que parce que la lumière est produite, et absorbée, par la matière. Si donc matière et lumière participent d'une même « nature », et relèvent par là même d'une même « physique » (l'étymologie de « physique » est *physis*, qui signifie « nature » en grec), il est légitime de se poser la question de savoir si la théorie de la lumière ne devrait pas obéir au même principe législateur et fondateur que la mécanique, le principe de relativité. Cela revient à supposer que la physique, en tant qu'étude de la Nature, est théoriquement une, ou unifiée si l'on préfère, c'est-à-dire relevant d'un seul et même principe, en l'occurrence le principe de relativité. Or il se trouve que la vitesse de la lumière, en tant que grandeur physique de la théorie de la lumière, n'obéit pas au principe de relativité. Ce qui jette un doute sur sa nature de « vitesse », du moins telle qu'elle est définie en mécanique, puisque principe de relativité et vitesse y ont partie liée. C'est en cherchant à rendre compatibles sur ce point, celui de la vitesse

de la lumière, la théorie de la lumière (alors appelée « électromagnétisme » pour des raisons qu'il serait trop long de développer ici) et le principe de relativité (dont le domaine de validité était jusqu'alors limité à la seule mécanique) qu'Einstein a été amené à « modifier nos idées d'espace et de temps », comme l'on dit de façon trop vague. En fait, dans son article de 1905, Einstein a achevé de rendre le temps de même « nature » que l'espace. Jusqu'alors le temps n'était pas relatif (on dit qu'il était « absolu »), en ce sens qu'il était le même, s'écoulait de la même façon, pour les deux observateurs dont il a été question dans l'énoncé du principe de relativité donné plus haut. Le temps était donc absolu alors que l'espace, lui, était « relatif » ; on veut dire par là que l'espace parcouru pour un « observateur » assis dans le train Marseille-Lyon entre le départ du train de Marseille-Saint Charles et son arrêt en gare de Lyon-Perrache est nul (l'observateur est toujours assis à la même place), alors que, pour un « observateur » situé sur le quai de la gare de Marseille, le chef de gare par exemple, il est d'environ 300 kilomètres. Einstein explique, en 1905, que si l'on rend le temps également relatif, c'est-à-dire si l'on considère que, comme l'espace parcouru, le temps écoulé entre deux événements (départ de Marseille et arrivée à Lyon) n'est pas le même pour le chef de gare de Marseille et pour le voyageur du train (en translation uniforme, ou quasiment, l'un par rapport à l'autre), si donc on s'arrange pour que le temps soit lui aussi relatif, la théorie de la lumière obéit au principe de relativité. Cela suppose que l'on cesse de penser la « vitesse de la lumière » comme la vitesse (au sens de la mécanique) de quelque chose et qu'on admette que cette soit disant « vitesse de la lumière » est en réalité une constante de la Nature (une « constante fondamentale », dont il sera question dans une autre intervention).

Résumons-nous. La physique, née avec l'invention de la vitesse instantanée, connaît une profonde refonte suscitée par le statut de « la vitesse de la lumière ». Au terme de cette refonte, la grandeur « vitesse de la lumière », invariante, apparaît comme une constante de la Nature. Mais la vitesse, quoi qu'il arrive, est toujours le rapport d'un intervalle d'espace à un intervalle de temps. Par ailleurs, temps et espace sont

devenus de même « nature », relatifs (et non pas absolus) l'un et l'autre. De là à penser que cette constante de la Nature, notée c , est un facteur de conversion universel de temps en espace, il n'y a qu'un pas qu'Einstein, dans son article de 1905, ne franchit pas explicitement.

C'est pourquoi il est faux de dire que l'« espace » de la physique est devenu quadri-dimensionnel en 1905. Ce n'est pas Einstein, mais Hermann Minkowski, en 1911, qui a explicitement décrit l'« espace » (au sens mathématique du terme) de la physique comme un espace à quatre dimensions, dont une de temps, muni d'une métrique (c'est-à-dire de la manière dont dans cet « espace », dénommé « espace-temps de Minkowski », on définit la distance entre deux « points », laquelle fait intervenir la constante c). Ce faisant, et bien qu'Einstein ait, dans un premier temps, trouvé le formalisme ainsi développé inutilement compliqué, Minkowski a jeté les premiers jalons de la théorie de la relativité générale développée par Einstein de 1907 à 1916.

Sans doute cela est-il compréhensible de nos jours. Pourtant, intuitivement, le non initié a toujours du mal à le concevoir. Par exemple, la lumière est à la fois onde et particule. En fait, qu'en voit-on ? De même, on a du mal à concevoir qu'une masse incurve l'espace. L'espace dans lequel on vit, que l'on perçoit avec nos sens, est toujours euclidien.

Il y a là deux questions. Commençons par la lumière. Vous dites « En fait, qu'en voit-on ? ». On ne voit pas la lumière, on ne la voit que si quelque chose s'interpose, des grains de poussière par exemple. On perçoit alors un point brillant, résultat de la déviation de la lumière par un de ces grains. Difficile, dans ces conditions, de mesurer sa vitesse. Je crois que c'est Galilée qui s'y est essayé le premier. Il avait placé deux observateurs sur deux des collines qui entourent Florence. Un premier observateur envoyait un signal avec une lanterne, l'autre le recevait et renvoyait alors un signal avec sa propre lanterne que le premier recevait à son tour, etc. La distance séparant les deux collines était connue ; restait à mesurer avec une clepsydre l'intervalle de temps séparant

l'émission et la réception du signal – ou plus exactement, plusieurs allers et retours, de manière à augmenter la précision de la mesure, qui de toute façon était fort imprécise. Par la suite, la vitesse de la lumière est restée un problème de mesure, donc d'amélioration de la précision. Avec Einstein, affirmant que la vitesse de la lumière est une vitesse d'un genre à part, une constante, la « vitesse de la lumière » change de statut. Si ce n'est pas la vitesse de quelque chose, au sens que le mot vitesse prend en mécanique, comment relier cette grandeur à la lumière ? On sait que la lumière n'est ni une onde ni un flot de particules ; elle est constituée d'objets, les photons, individualisés mais non localisés, d'une espèce radicalement différente de ce que l'on rencontre dans le monde macroscopique, où les objets sont soit des ondes, soit des particules. La constante c est alors la vitesse associée à ces photons ; on ne peut pas dire que c'est leur vitesse comme s'il s'agissait de balles de fusil. Il serait plus correct d'assumer le paradoxe et de dire que les photons « se propagent » tous à la vitesse c . En réalité, le fait que cette vitesse de propagation soit égale à la constante qui structure l'espace-temps de Minkowski est lié à la valeur supposée nulle de leur masse.

La seconde question est différente : en effet, il n'y a rien d'intuitif dans le fait qu'une masse – pas n'importe laquelle d'ailleurs, une masse de l'ordre de la masse du Soleil incurve, non pas l'espace mais l'espace *via* l'espace-temps. La relativité générale, distincte de la relativité restreinte bien qu'elle en soit issue, et qui n'a été achevée qu'en 1916, montre mathématiquement que l'espace-temps a une structure qui dépend des masses qui y sont placées. Au lieu d'être euclidien, c'est-à-dire uniforme dans les trois directions d'espace et selon l'axe des temps, l'espace réel, notre espace, est incurvé. Bernhard Riemann avait déjà eu une intuition de ce type quelques années auparavant, mais il n'avait en aucune façon démontré que notre espace, l'espace réel, est incurvé. Nous ne le « sentons » pas, mais nous en avons des indices sophistiqués grâce à des mesures fines. En effet, si l'espace est incurvé, ce n'est pas la ligne droite qui y représente le plus court chemin d'un point à un autre ; si par ailleurs, on admet que la lumière suit le plus court chemin, on en conclut que pour aller d'un point à un autre, elle suit un trajet