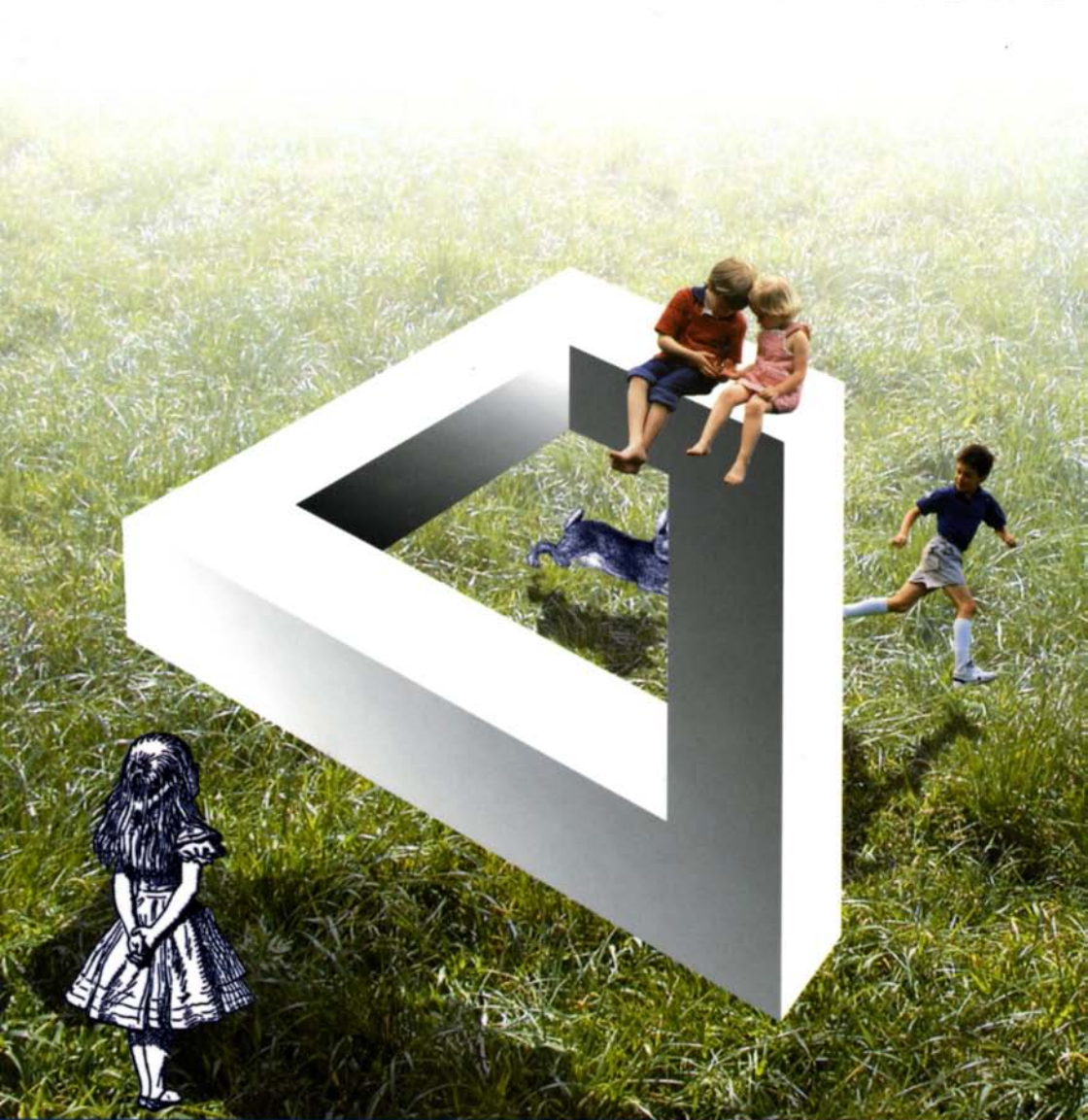


Le réel et ses dimensions



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

courbe. Exemple : nous recevons de la lumière en provenance d'étoiles pourtant situées derrière le Soleil (par rapport à nous) et dont nous devrions ne recevoir aucun rayonnement (puisqu'il y a le Soleil entre elle et nous) si la lumière allait en ligne droite. La seule conclusion possible est que cette lumière a contourné le Soleil. L'observation de ce phénomène a constitué le premier test expérimental de la théorie de la relativité générale, la preuve tangible que ce que disait Einstein avait un rapport avec la réalité. Pourtant, la précision des mesures effectuées en 1919 n'était pas encore suffisante pour pouvoir affirmer qu'Einstein avait raison. Il en aurait fallu bien plus pour empêcher Arthur Eddington, l'astronome anglais responsable de l'expédition qui devait observer le phénomène, de proclamer qu'Einstein avait raison. De toute façon, les observations ont été refaites plusieurs fois depuis et le doute n'est plus permis.

Il y eut aussi une observation de Mercure alors qu'elle était de l'autre côté du Soleil.

Il s'agit d'un tout autre effet – ne serait-ce que parce que Mercure n'est pas une étoile, et n'envoie donc pas de lumière par elle-même. L'effet en question, prévu par la théorie de la relativité générale, porte le nom d'« avance du périhélie de Mercure ». Le périhélie est le lieu de la trajectoire d'une planète où elle est la plus proche du Soleil. L'avance du périhélie correspond à une lente rotation de l'orbite d'une planète dans son plan, dans le même sens que le mouvement orbital. L'avance du périhélie de Mercure est de l'ordre de quelques secondes d'arc par siècle, je dis bien : par siècle. Les résultats des calculs effectués par les mathématiciens du XVIII^e siècle ne correspondaient pas à ce que l'on observait. Alors qu'il était en train de développer sa théorie de la relativité générale, Einstein refit ces calculs sur la base des éléments de théorie dont il disposait... et obtint une valeur correspondant à celle observée.

On voit bien qu'il s'agit là d'un autre effet que celui mentionné auparavant et qui concernait la courbure des rayons lumineux au voi-

sinage d'une masse importante (celle du Soleil en l'occurrence). L'histoire de l'observation de cette courbure est intéressante parce qu'elle est mêlée à la grande histoire. L'effet de courbure des rayons a été prédit aux environs des années 1911-1912. Pour pouvoir constater qu'une étoile cachée derrière le Soleil est quand même visible, il faut évidemment opérer à un moment et en un lieu d'éclipse totale du Soleil, pour que la faible clarté de l'étoile ne soit pas noyée dans l'énorme émission de lumière du Soleil. Il se trouve qu'une éclipse de Soleil devait avoir lieu en août 1914. Une équipe allemande, emmenée par Karl Schwarzschild, directeur de l'Observatoire de Berlin, devait se rendre en Russie, où l'éclipse devait être particulièrement visible. Seulement, voilà : août 14 s'avéra ne pas être la meilleure date pour faire des observations astronomiques, puisque la guerre fut déclarée quelques jours avant la date prévue pour l'éclipse. Le malheureux Schwarzschild fut fait prisonnier et l'observation des effets prévus par la théorie remise aux calendes grecques. Il a fallu attendre la fin de la guerre pour qu'en 1919, une expédition soit mise sur pied par Sir Arthur Eddington – un être assez singulier, astronome royal de Cambridge, une sommité dans la hiérarchie universitaire anglaise, mais aussi objecteur de conscience, ce qui lui avait valu des ennuis pendant la guerre – pour aller observer une éclipse de Soleil visible à la latitude du Brésil. Il y eut deux expéditions, une du côté du Brésil et l'autre du côté de l'Afrique. Ayant observé, après bien des péripéties, que l'on voyait bien une étoile située derrière le Soleil, qu'on n'aurait pas dû voir si la lumière allait en ligne droite, Eddington envoya un télégramme en Hollande (les relations n'étaient pas rétablies entre l'Allemagne et l'Angleterre), annonçant la nouvelle. On dit – et c'est vraisemblable – qu'Einstein ayant lu le télégramme marmonna : « Cela ne m'étonne pas : le contraire aurait été dommage pour Dieu. »

Assez fréquemment, lorsque des théories physiques sont élaborées, des observations ou des expérimentations viennent les confirmer, mais pour une formalisation conceptuelle achevée, les modèles mathématiques sont le plus souvent indispensables, quand ils n'ont pas précédé l'élaboration théorique.

Il n'y a pas de physique, au sens moderne du terme, sans mathématiques. Galilée disait déjà que la Nature est mathématique. L'exemple de l'invention de la vitesse instantanée est de ce point de vue exemplaire. La physique post-galiléenne est mathématique de part en part. On ne peut pas dissocier mathématique et physique. Il y a toujours une représentation mathématique de ce que l'on appelle des idées physiques, c'est-à-dire des idées concernant la réalité des choses. Le plus étonnant est justement que les mathématiques soient le langage du monde, que le grand livre de la Nature soit écrit en termes géométriques.

La notion d'espace courbe est quasi concomitante de l'élaboration de la géométrie de Riemann. Les mathématiciens offrent quelquefois des cadres qui permettent à la physique de s'exprimer.

C'est même là une chose assez étonnante : souvent, au cours de son histoire, la physique a trouvé les concepts dont elle avait besoin dans les avancées les plus récentes des mathématiques. C'est comme s'il existait une sorte d'harmonie préétablie... Un autre exemple généralement cité est celui de la théorie quantique qui n'a pu se développer que parce que les mathématiciens, plus exactement David Hilbert, venaient d'inventer le concept d'espace mathématique abstrait, fondamental en théorie quantique et dont la physique n'avait pas eu vraiment besoin auparavant.

Inversement, les développements en série de Fourier et la transformation de Fourier, du nom de Joseph Fourier, un mathématicien français de l'époque de Napoléon, sont nés des efforts déployés pour résoudre un problème de physique lié à la propagation de la chaleur. Dans ce cas, les mathématiques ont progressé grâce à un problème physique.

Alors, de nos jours le réel, ce serait quoi ?

Impossible de le dire en quelques lignes. De façon brève, le réel pour un physicien est nécessairement mathématique. Il n'y a pas d'autre réel,

le réel ne peut être que mathématique. Il ne faut surtout pas entendre par là quelque chose du genre : le réel est virtuel. Absolument pas. Le réel du physicien est extrêmement contraignant – aussi contraignant que peuvent l'être les mathématiques. Je serais tentée de penser que le réel est ce qui reste, non pas à l'instar de la culture quand on a tout oublié, mais quand aucune des contraintes (du genre du principe de relativité) n'a été « oubliée », c'est-à-dire n'est restée non satisfaite.

Bibliographie

Jean-Paul Auffray, *L'Espace-temps*, Paris, Flammarion, Collection « Dominos », 2001,

Albert Einstein, *La Relativité*, Paris, Petite Bibliothèque Payot, 1956.

Albert Einstein (avec L. Infeld), *L'évolution des idées en physique*, Paris, Petite bibliothèque Payot, 1963, réédité régulièrement par les éditions Flammarion, collection « Champs-Flammarion ».

Albert Einstein, *Œuvres choisies*, vol. 3, (voir en particulier l'article original de 1905 et les diverses introductions), Paris, Le Seuil-CNRS Éditions, Collection « Sources du Savoir », 1989.

Nayla Farouki, *La Relativité*, Paris, Flammarion, Collection « Dominos », 2000.

Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, traduction française de R. Fréreau, Paris, Le Seuil, collection « Sources du savoir », 1992.

Jean-Marc Lévy-Leblond, « La structure de l'espace-temps », *L'espace et le temps aujourd'hui*, Paris, Le Seuil, Collection Points-Sciences, 1982.

DIMENSIONS ET CONSTANTES FONDAMENTALES

Jean-Philippe Uzan*

Il existe des constantes dans presque tous les domaines de la science : en algèbre, en analyse mathématique, en chimie et en physique classique, en informatique, et même en biologie. Les constantes dont il sera question ici concernent plus particulièrement certaines grandeurs fondamentales sur lesquelles se fondent les grandes théories de la physique. Il va de soi qu'elles se mesurent, ce qui autorise à parler de dimensions à leur propos. Toutefois, le terme de dimension ne se cantonnera pas ici à l'acception de dimensions d'espace et de temps.

En effet, le premier sens de *dimension* qui vient à l'esprit, et auquel une partie de cet ouvrage est consacrée, concerne le nombre de dimensions d'espace et de temps. En science, il y a au moins une autre acception. En physique, on doit effectuer des mesures pour comparer nos théories au monde « réel », c'est-à-dire comparer certaines caractéristiques de nos objets d'étude à des objets dont les caractéristiques ont été choisies comme référence. D'une certaine façon, la physique traite

* Laboratoire de Physique Théorique, CNRS-UMR 8627, Université Paris sud, bât. 210, 91405 Orsay Cedex et Institut d'Astrophysique de Paris, GReCO, CNRS-FRE 2435, 98 bis boulevard Arago, 75014 Paris.

d'objets commensurables. Les objets de référence sont dénommés *unités*. Les *dimensions* de mon objet d'étude sont l'ensemble de ses caractéristiques commensurables. Prenons un exemple : je peux caractériser un bâton par sa longueur et sa masse. Sa longueur sera obtenue en comparant le bâton à une règle choisie comme référence et que j'appellerai le mètre. Sa masse sera obtenue en le comparant, grâce à une balance, à une masse de référence ; appelons-la le kilogramme. Le résultat de ces deux comparaisons sera donné par deux nombres purs (le rapport de la longueur du bâton au mètre de référence et le rapport de sa masse au kilogramme de référence). Disons que j'obtienne respectivement 3 et 2 ; cela signifie que mon bâton mesure 3 mètres et pèse 2 kilogrammes. Je peux communiquer ces mesures à l'un de mes collègues qui sera capable de construire un bâton identique : les unités de ma mesure (mètre, kilogramme) lui indiquant à quelles références comparer sa construction.

Dans cet exemple, sont apparus des objets de référence que j'ai dénommés *unités*. La caractéristique physique liée à chacune des références est ce que j'appelle la *dimension* : la longueur, la masse, le temps... Toute quantité physique est donc décrite par une série de nombres, certains étant dimensionnés¹ (sa longueur...), d'autres étant des nombres purs (c'est le cas du rapport entre la longueur et la largeur d'un rectangle). Parmi toutes les dimensions (et donc les unités) que je peux concevoir, certaines² sont des « produits dérivés » ; par exemple la surface est un produit de deux longueurs et sera mesurée en mètres carrés. Il n'est donc pas nécessaire d'introduire une nouvelle unité pour caractériser la surface. De combien de dimensions ou, de façon équivalente, de combien d'unités avons-nous besoin pour décrire toutes les quantités de la physique ? C'est une question à laquelle il nous faudra revenir un peu plus tard.

1. – Toute quantité physique dimensionnée, appelons la Q , peut toujours se décomposer selon $Q = \{Q\} [Q]$ où $\{Q\}$ est un nombre pur et $[Q]$ un symbole rappelant la référence utilisée pour faire la mesure. Par exemple, pour notre bâton nous avons $Q = 3 \text{ m}$ (longueur), $\{Q\} = 3$ et $[Q] = \text{m}$ (symbole du mètre).

Pour la vitesse de la lumière, nous avons $\{c\} = 299\,792\,458$ et $[c] = \text{m.s}^{-1}$. Rappelons encore que les unités utilisées sont complètement arbitraires et qu'une mesure physique se ramène toujours à la comparaison de deux systèmes physiques de telle sorte que seul le rapport $Q_1/Q_2 = \{Q_1\}/\{Q_2\}$ est expérimentalement accessible.

2. – Dans toute la suite de ce texte, je noterai M , L et T les dimensions de masse, longueur et temps respectivement. Dans le système international, elles sont associées aux unités kilogramme (kg), mètre (m) et seconde (s).

La physique fournit aussi des lois qui mettent en relation différentes quantités physiques. Ces lois, écrites en général sous forme mathématique³, font intervenir deux types de termes : les premiers, que j'appellerai *variables*⁴, représentent les caractéristiques de mon objet d'étude (mon système). Les secondes sont des quantités supposées invariantes dans le temps et dans l'espace, les *constantes de la Nature*.

Pourquoi doit-on introduire de telles constantes ? Une des raisons est que chaque loi physique, c'est-à-dire chaque équation mathématique, est une phrase qui doit avoir un sens. Pour cela, il faut que les objets qui sont mis en relation aient même dimension. On peut multiplier des quantités de dimensions différentes, mais on ne peut pas, par exemple, les additionner. Ce qui nous paraît une évidence a en fait mis longtemps à émerger et aurait été une hérésie pour Galilée ou même Newton, comme pour tous les scientifiques de leur époque, qui ne mettent en relation que des quantités sans dimension. Prenons l'exemple d'un corps en chute libre. Si je veux mettre en relation la vitesse du corps, v , et le temps de chute, t , je dois traduire des mètres par seconde en seconde et il me faut pour cela introduire une quantité qui a la dimension mètre par seconde carrée (m/s^2), c'est-à-dire une accélération, g , pour écrire $v = gt$. Galilée et ses contemporains auraient mis en relation les vitesses v_1 et v_2 au bout du temps de chute t_1 et t_2 pour écrire $v_1/v_2 = t_1/t_2$. Dans ce cas, aucune constante dimensionnée n'apparaît ; il peut cependant apparaître des nombres purs. Le fait d'avoir introduit des dimensions nous oblige donc à introduire des constantes qui elles aussi ont des dimensions. Il apparaît dès à présent

3. – Une équation est une expression exprimant une équivalence (un équilibre) entre différents concepts. D'un point de vue strictement mathématique, c'est une expression abstraite (une règle). En physique, ces équations font intervenir des symboles représentant des quantités qu'un expérimentateur peut en principe mesurer. Il est assez étonnant que de telles expressions décrivent les lois de la Nature (ou du moins semblent, à la précision de nos expériences) et soient un des outils les plus puissants de nos recherches. Il aurait bien sûr pu en être autrement. Richard Feynman a émis l'idée que les lois de la Nature pourraient s'exprimer à travers un ensemble de règles (comme par exemple aux échecs) et non pas par des lois mathématiques (voir R. Feynman, *The character of physical law*, Penguin, London, 1992). Un exemple d'une telle situation est « le jeu de la vie » inventé par le mathématicien John Conway. Remarquons aussi que certaines théories scientifiques comme la théorie de l'évolution ou la dérive des continents ne sont pas formulées sous forme mathématique.

4. – À titre d'exemple, la vitesse et la position d'un mobile, la température d'un solide, la luminosité d'une lampe, etc. Il faut aussi faire intervenir des opérateurs qui caractérisent les opérations à effectuer sur ces variables.

que la valeur numérique de ces constantes va dépendre des unités choisies comme référence : notre vitesse n'aura pas la même valeur numérique si on change la valeur de ce que l'on appelle un mètre.

En conclusion, mesurer revient à comparer à des systèmes physiques choisis comme références et donc à l'introduction d'unités, de dimensions associées et de constantes dimensionnées dans les lois de la physique.

Certaines constantes sont évidentes, naturelles pourrait-on dire. En revanche, d'autres semblent arbitraires.

C'est une question difficile, qui dépasse le cadre de la physique seule. Est-on capable de faire une liste de constantes ? Certaines sont-elles plus fondamentales que d'autres ? Dès que le mot *fondamental* apparaît, une sorte de hiérarchie semble présupposée.

Il n'y a pas de liste absolue de constantes. Ces constantes apparaissent dans un cadre théorique donné. Dès que l'on choisit un ensemble de théories censées décrire la Nature, nous nous retrouvons avec des paramètres qui ne sont pas (et ne peuvent pas) être fixés par ces théories. Comme le résume très clairement Steven Weinberg⁵, la notion et le statut de constante dépendent du temps et de notre connaissance de la physique, mais aussi de la personne qui définit la liste de constantes : « The membership of a list of “fundamental” constants necessarily depends on who is compiling the list. A hydrodynamicist might reasonably include the density and viscosity of water, while an atomic physicist would doubtless include the proton mass and electronic charge. [...] a different sort of list : a list of the constant that appear in the laws of nature at the deepest level that we yet understand, constants whose value we cannot calculate with precision in terms of more fundamental constants, not just because the computation is too complicated (as for the viscosity of water or the mass of the proton) but because we do not

5. – S. Weinberg, Overview of theoretical prospects for understanding the values of fundamental constants, *Phil. Trans R. Soc. Lond. A*, 310, 249-252 (1983).

know of anything more fundamental. The membership of such a list of fundamental constants thus reflects our present understanding of fundamental physics. Also, each constant on the list is a challenge for future work, to try to explain its value. »

Cette définition est assez négative : à chaque étape de nos constructions théoriques, il subsiste toujours des constantes qui ne peuvent pas être expliquées en termes de constantes plus fondamentales, simplement parce qu'elles n'existent pas. Ces constantes peuvent être simplement mesurées. Soit ces paramètres sont véritablement des constantes fondamentales, auquel cas, on ne pourra effectivement que mesurer leur valeur⁶, soit elles ne le sont pas et on peut alors espérer formuler une théorie plus générale capable de prédire leur valeur.

Ne pourrait-on pas dire que l'existence de ces constantes reflète notre ignorance scientifique ?

C'est d'une certaine façon, ce que ma précédente réponse exprimait. Supposer que des paramètres arbitraires sont des constantes, c'est-à-dire que leur valeur ne dépend pas de l'espace et du temps, revient à accepter que nous sommes incapables d'écrire une équation d'évolution pour ces paramètres. Cependant, cette hypothèse est en général contrôlée par le simple fait que nous voulons que les résultats de nos expériences soient reproductibles à divers moments et dans divers laboratoires. Si c'est le cas, dans la limite des précisions expérimentales, on peut considérer que notre hypothèse de constante est valide.

Reprenons l'exemple du corps en chute libre que nous avons évoqué précédemment. La loi de Galilée (reformulée en termes modernes) fait intervenir la constante g , l'accélération due à la Terre. Ce paramètre est

6. – On a souvent cru que la science était arrivée au summum de son art et que la seule activité qui resterait aux scientifiques serait de mesurer ces constantes avec des précisions de plus en plus fines. James Clerk Maxwell exprime ce sentiment dans son discours inaugural à l'université de Cambridge en 1871 : « ...in a few years, all the great physical constants will have been approximately estimated, and [...] the only occupation which will be left to the men of science will be to carry these measurements to another place of decimals. » Heureusement, même les plus grands hommes de science peuvent faire des extrapolations erronées !

une constante fondamentale à ce niveau de description. Cependant, depuis qu'Isaac Newton a formulé sa loi de la gravitation universelle, on peut exprimer g en fonction d'autres paramètres : la constante de Newton, G , le rayon et la masse de la Terre⁷. Ainsi, on explique une constante d'une théorie en termes de paramètres d'une théorie plus générale. De ce point de vue, on ne peut plus dire qu'elle est fondamentale : elle est devenue un paramètre dérivé.

Cela ne veut pas dire que l'on ne peut pas classer les constantes entre elles. Jean-Marc Lévy-Leblond⁸ a proposé, dans les années 1970, de les classer en trois catégories :

Type A : constante caractérisant les propriétés d'un système physique particulier (exemple : charge et masse de l'électron) ;

Type B : constante caractérisant les propriétés de toute une classe de phénomènes (exemple : constantes de couplages) ;

Type C : constante universelle transcendant les systèmes physiques et apparaissant dans les lois fondamentales de la physique (exemple : la vitesse de la lumière⁹).

On peut (et on doit) compléter cette liste par une quatrième catégorie :

Type D : constante de référence, dont la valeur numérique a été fixée par décret et qui entre explicitement dans la définition de nos systèmes d'unités.

Cette ultime catégorie se justifie par le fait que la précision expérimentale de la détermination de certaines constantes fondamentales est limitée par la précision et la reproductibilité de la réalisation des unités

7. – La relation entre toutes ces quantités est donnée par $g = G M_{\text{terre}}/R_{\text{terre}}^2$.

8. – J.-M. Lévy-Leblond, *The importance of being (a) constant*, Enrico Fermi School LXXII (North Holland, 1979).

9. – À ce sujet, on pourra consulter : G. F. R. Ellis and J.-Ph. Uzan, 'c' is for the speed of light, isn't it ?, *Phys. Rev. D* (à paraître).

physiques. Ainsi il devient avantageux de redéfinir cette unité en fonction de la constante en question. La vitesse de la lumière¹⁰ entre dans cette catégorie depuis 1983. En fait, elle entre dans la définition du mètre, donc, c'est ce qu'on appelle un mètre qui est dérivé, et non pas ce qu'on appelle vitesse de la lumière. C'est une constante gravée dans le marbre jusqu'à ce que la loi change. Actuellement, la possibilité de définir le kilogramme à partir de la constante de Planck est à l'étude. La figure 2 propose une mini-biographie de la constante de Planck, de la constante de Newton et de la vitesse de la lumière et décrit leur changement de statut dans la classification précédente.

Il y a donc bien de l'arbitraire. La métrologie, par exemple, dans la réalisation de ses références, reflète l'état de la connaissance dans le domaine de la science. Le mètre a changé plusieurs fois de référence. Il fut d'abord représenté par le mètre étalon au Pavillon de Sèvres, ensuite il fut vibration et maintenant il se réfère à la vitesse de la lumière.

On peut penser le contraire. Si l'on prend un peu de recul, on se rend compte que le plus souvent, il y a eu une volonté d'*homogénéiser la définition* des systèmes d'unités. Ainsi, au Moyen Age, les unités de volume, de poids ou de distance étaient spécifiques à chaque région. Cela entravait les échanges commerciaux¹¹ et créait des confusions (il fallait connaître les facteurs de conversion d'une unité à l'autre, ce qui est une source d'erreurs et de fraude).

Parallèlement, il y a eu une volonté de *diminuer l'anthropomorphisme* des systèmes d'unités. Des unités de longueur anciennes comme le pouce, le pied, le pas, l'empan ou la coudée illustrent cet

10. – Pour les détails concernant ce choix et l'évolution de la définition du mètre on pourra se référer à P. Giacomo, *Eur. J. Phys.* 4, 1983, 190.

11. – Un exemple récent d'homogénéisation de divers systèmes d'unités est le passage à la monnaie européenne unique en janvier 2001. Une des raisons de ce changement est liée à la simplification des échanges commerciaux entre les divers États membres. Cela permet entre autres de comparer les prix dans divers pays sans avoir à prendre en compte les taux de change et les frais bancaires. Cette logique a été appliquée à la masse, à la longueur et au temps bien avant...

anthropomorphisme. Mais de quel pied parle-t-on ? Bien sûr on peut penser au roi ou autre personnage charismatique d'une société¹², ce qui ne diminue pas beaucoup l'arbitraire ! Passer de la longueur du pied d'un individu au système métrique est une grande avancée vers l'objectivité.

À la Révolution française, un élan scientifique visa à définir des unités indépendantes d'une personne ou d'une société donnée (probablement sous l'impulsion des idéaux universalistes tels que l'égalité¹³). Le 26 mars 1791, l'Assemblée, sous l'impulsion de Charles Maurice Talleyrand, proposa une loi en ce sens. Le mètre défini comme le quarante millionième de la longueur d'un méridien terrestre¹⁴ fut introduit en 1793. En 1795, le kilogramme est défini comme la masse de 1 000 centimètres cubes d'eau à la température de 4 degrés centigrades. Cette définition sera remplacée en 1799 par un kilogramme étalon conservé au pavillon de Sèvres. Le dépôt aux Archives de la République, le 22 juin 1799, des deux barres-étalon de platine représentant le mètre et le kilogramme peut être considéré comme le premier pas vers la définition d'un système d'unités international.

Cela mena à la définition d'un *système décimal métrique*¹⁵ d'unités. La quête des physiciens pour s'affranchir au mieux de notre subjectivité

12. – Un exemple immortalisé par Albert Uderzo et René Goscinny dans *Astérix aux jeux olympiques*, nous rappelle que la piste de 600 pieds du stade d'Olympie mesure 192,27 mètres. L'étalon de référence est ici connu, il s'agit du pied d'Héraclès, « ...ce qui permet de savoir que le demi-dieu chaussait du 46, environ ».

13. – Lors des réunions préparatoires aux États Généraux, un slogan populaire était « un roi, une loi, un poids, une mesure ». Les cahiers de doléances de 1789 abordent cette question en permanence en partie via des revendications anti-seigneuriales (« Chaque seigneur pour l'ordinaire de ce pays a son boisseau différent »...), des problèmes de litiges concernant les marchés ou les impôts (« Que les boisseaux des seigneurs soient tous mis au point déterminé par étalon déposé au greffe de la capitale, afin que les agents de ces mêmes seigneurs ne soient plus dans le cas de vexer les malheureux tenanciers », « C'est enfin dans les marchés que les grainetiers s'entendent à verser les grains dans les mesures avec tant de légèreté que même la contenance ne s'y peut trouver »).

14. – Définition rendue possible par la détermination de la longueur de la partie du méridien entre Barcelone et Dunkerque par Pierre François Méchain et Jean-Baptiste Delambre entre 1792 et 1798. Dans le rapport de l'Académie des Sciences rédigé par Condorcet et lu à l'Assemblée le 26 mars 1791, trois possibilités sont évoquées : la période d'un pendule, une référence à l'équateur et une au méridien. Le 26 mars 1791, un décret choisit le quart du méridien comme référence et lance la campagne de mesure.

15. – Le système métrique fut institué en France par la loi du 18 Germinal an III, devint légal avec la loi du 19 Frimaire an VIII puis obligatoire à partir du 1^{er} janvier 1840 par la loi du 4 juillet 1837. Le décret du 1^{er} août 1793 donne une liste des unités du nouveau système pour les longueurs, surfaces, volumes et la monnaie.

humaine¹⁶ les poussera à rechercher dans les lois physiques elles-mêmes des unités privilégiées, les *unités naturelles*. Les étalons définis à la Révolution ne sont qu'une première étape : ils peuvent varier du fait de l'usure par exemple. On essaiera donc de trouver des références dans les lois et les constituants de la Nature, comme par exemple une transition atomique du krypton 86 pour définir le mètre.

On peut alors se demander combien d'unités sont nécessaires pour décrire tous les objets que manipule la physique. Un élément de réponse est apporté en 1832 par Carl Friedrich Gauss. Il fut le premier à faire des mesures absolues du champ magnétique terrestre en utilisant un *système décimal fondé sur trois unités mécaniques* : le centimètre, le gramme et la seconde dont il étendra l'utilisation aux phénomènes électriques avec Wilhelm Weber. Cela incitera James Clerck Maxwell et Joseph Thomson à formuler, en 1860, le besoin d'un système cohérent d'unités ayant des *unités de base* et des *unités dérivées*, puis à l'introduction du système CGS (centimètre, gramme, seconde) en 1874. Le système CGS s'avère cependant peu pratique pour la description des phénomènes électromagnétiques ; il sera étendu en un *système d'unités pratiques* qui contient l'Ohm, le Volt et l'Ampère comme unités de résistance, de tension et de courant. En 1889, la seconde astronomique est choisie comme référence de temps et forme, avec les deux étalons de longueur et de masse, un système d'unité mécanique similaire au système CGS mais avec comme unités le mètre, le kilogramme et la seconde (MKS). En 1901, Giovanni Giorgi démontre qu'il est possible de combiner le système MKS et le système d'unité pratique en un seul système avec 4 unités de base, ce qui ouvrira la voie à l'introduction du système MKSA (mètre, kilogramme, seconde, Ampère). Pour finir, le

16. – Ce but fut clairement exprimé par Maxwell lors d'un discours à la conférence de l'association britannique pour l'avancement des sciences en 1870 : « Yet, after all, the dimensions of our Earth and its time of rotation, though, relatively to our present means of comparison, very permanent, are not so by any physical necessity. The Earth might contract by cooling, or it might be enlarged by a layer of meteorites falling on it, or its rate of revolution might slowly slacken, and yet it would continue to be as much a planet as before. But a molecule, say of hydrogen, if either its mass or its time of vibration were to be altered in the least, would no longer be a molecule of hydrogen. If, then, we wish to obtain standards of length, time, and mass which shall be absolutely permanent, we must seek them not in the dimensions, or motion, or the mass of our planet, but in the wavelength, the period of vibration, and the absolute mass of these imperishable and unalterable and perfectly similar molecules. » Par molécule, Maxwell entend atome.

système d'unités international actuel est composé de 7 unités de base et de 17 unités dérivées (voir la figure 1 décrivant les unités de base et leur relation avec diverses constantes).

Cela signifie-t-il que sept unités sont nécessaires ? En fait non, comme l'analyse de Gauss le suggère. L'introduction des sept unités de base représente un équilibre entre le pragmatisme des expérimentateurs (qui ont besoin d'unités adaptées à leurs mesures) et l'idéalisme des

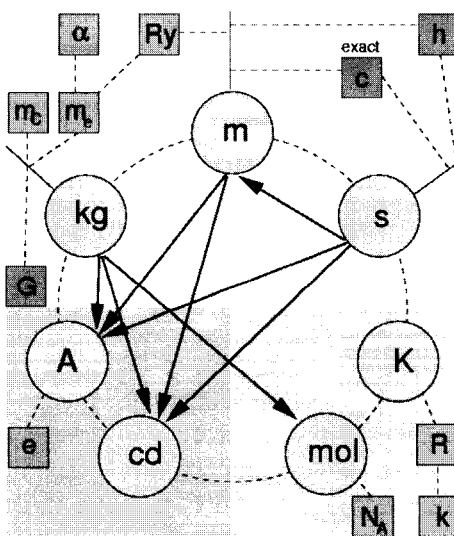


Figure 1. Les sept unités de base du système international – le mètre (m), la seconde (s), le kilogramme (kg), l'Ampère (A), le candela (cd), la mole (mol) et le Kelvin (K). Les flèches indiquent l'influence d'une unité sur la définition d'une autre unité. On peut remarquer qu'aucune flèche n'arrive aux trois unités fondamentales (m, kg, s). La mole et le Kelvin sont complètement séparés des autres unités, ce qui renforce l'idée que le Kelvin est en fait une unité d'énergie (et la constante de Boltzmann un facteur de conversion). La mole est un nombre pur. L'Ampère et le candela peuvent s'exprimer en fonctions des autres unités. Nous avons aussi représenté le lien entre ces unités et certaines constantes : les trois constantes fondamentales (c , h et G), la constante de structure fine (α), les masses du carbone 12 et de l'électron, la constante de Rydberg (Ry), la charge électrique élémentaire (e), la constante de Boltzmann (k), le nombre d'Avogadro (N_A) et la constante des gaz parfaits (R).

théoriciens (dont le but est de réduire l'arbitraire, la redondance à son minimum). Parmi les sept unités de base, la mole, le Kelvin, le Candela et l'Ampère peuvent être dérivés des trois autres unités¹⁷.

En conclusion, on peut considérer qu'il faut *trois dimensions fondamentales* : la longueur, la masse et le temps, même si pour des raisons pratiques d'autres dimensions sont utilisées.

La question devient *existe-t-il des étalons privilégiés pour ces trois unités* ? Là, en effet, il y a de l'arbitraire. Le changement de réalisation d'une unité fondamentale (donc du système physique utilisé comme référence) est en général lié à l'avancement de la technologie. Rappelons-nous l'exemple du mètre dont la référence a changé parce qu'on n'était plus capable de mesurer la vitesse de la lumière avec suffisamment de précision. Ainsi, l'évolution technologique pousse à changer la réalisation des unités, pas des unités elles-mêmes ! La précision sur la détermination du mètre était de l'ordre de 0,01 % avec l'étalon de platine, et de 10^{-8} avec le krypton 86.

Toutes les constantes sont-elles définissables en référence aux trois unités précédemment citées, la constante de gravitation, la vitesse de la lumière et la constante de Planck, pour ne citer qu'elles ?

Toute liste de constantes contiendra beaucoup plus que trois constantes¹⁸. Nous pouvons toujours séparer cette liste en deux sous-listes. La première sera une liste de trois constantes dimensionnées permettant de construire les trois dimensions fondamentales (*voir l'encadré à*

17. – À titre d'exemple, voyons pourquoi le système MKSA possède une unité « redondante ». Un courant électrique est un flux d'électrons, ce qui signifie que l'Ampère peut s'exprimer en fonction de L , M et du Coulomb (unité de charge électrique). La force entre deux charges, e , distantes de R est donnée par $F = e^2/4\pi\epsilon_0 R^2$.

Pour rendre compatible l'unité de force ($M.L.T^{-2}$) avec le second membre qui a pour dimension $C^2 M^{-2} \epsilon_0^{-1}$, on a dû introduire la constante dimensionnée ϵ_0 . Cependant, une alternative est possible : ne pas introduire de nouvelle constante et écrire directement $F = e^2/R^2$, ce qui implique que l'unité de charge est déterminée par $M^{1/2} L^{3/2} T^{-1}$ et donc que l'Ampère n'est qu'un dérivé du mètre, du kilogramme et de la seconde. Cette démarche « à la Gauss » est très économique, il faut une unité et une constante de moins pour la description des phénomènes physiques !

18. – À titre d'exemple, si nous considérons le modèle standard de la physique des particules et la relativité générale comme cadre théorique, alors nous pouvons dénombrer 20 paramètres libres. Si les neutrinos sont massifs, il faut ajouter 7 paramètres.

la fin du texte). La seconde sera une liste de nombres purs. Le choix des constantes dimensionnées est arbitraire, mais quel qu'il soit, seules trois constantes sont nécessaires. Supposons que je mette dans cette liste de trois constantes la masse du proton, je pourrais ensuite mettre dans ma seconde liste le rapport de la masse de l'électron à celle du proton, le rapport de la masse du neutron à celle du proton, etc. et donc transformer toutes mes autres constantes dimensionnées en quantités sans dimension¹⁹.

Quel ensemble est le plus fondamental, celui des trois constantes dimensionnées ou la longue liste de tous ces nombres sans dimension ? Alors que la première liste est arbitraire, la valeur des nombres de la seconde liste ne l'est pas du tout : ils ne dépendent pas du choix d'un système d'unités particulier. Ce sont ces nombres qui caractérisent l'amplitude relative de diverses quantités et phénomènes physiques et donc qui encodent véritablement l'essence de la Nature. À ce titre, on peut considérer que ce sont les véritables constantes fondamentales. Un espoir du physicien théoricien est que tous ces nombres qui semblent être absolus puissent être expliqués par une théorie plus générale²⁰ !

Reste la première liste de constantes qu'il faudrait, pour satisfaire Maxwell, être capable de choisir de façon naturelle pour définir un temps, une distance et une masse fondamentale. Un savant irlandais du XIX^e siècle, George Johnstone Stoney, célèbre pour avoir inventé le mot « électron » est le premier à s'être rendu compte que cela était

19. – Ces quantités sans dimension ne représentent rien d'autres que la valeur numérique des constantes dimensionnées dans le système d'unités défini à partir des trois constantes de la première liste.

20. – Einstein exprimait cette opinion dans une de ses correspondances ainsi : « Or one could put it like this : In a reasonable theory there are no dimensionless numbers whose values are only empirically determinable. Of course, I cannot prove this. But I cannot imagine a unified and reasonable theory which explicitly contains a number which the whim of the Creator might just as well have chosen differently, whereby a qualitatively different lawfulness of the world would have resulted. Or one could put it like this : A theory which in its fundamental equations explicitly contains a non-basic constant would have to be somehow constructed from bits and pieces which are logically independent of each other ; but I am confident that this world is not such that so ugly a construction is needed for its theoretical comprehension. »

21. – Dans G. Johnstone Stoney, *Phil. Mag.* 11, 1881, 381, on peut lire : « Nature presents us with three such units : and that if we take these as our fundamental units instead of choosing them arbitrarily, we shall bring our quantitative expressions into a more convenient, and doubtless into a more intimate relation with Nature as it actually exists. »

possible²¹. À partir de la constante de gravitation, de la vitesse de la lumière et de la charge de l'électron, il établit qu'on pouvait définir une longueur fondamentale, un temps fondamental et une masse fondamentale²². Ces unités sont déterminées par les lois de la physique, supposées être universelles ; elles sont donc indépendantes de toutes nos constructions humaines puisque dictées (offertes ?) par la Nature elle-même.

Quand Max Planck introduit sa constante, en 1900, il se rendit compte lui aussi qu'il pouvait créer trois unités fondamentales²³. Ce sont les unités de Planck ou *unités naturelles*²⁴. Les physiciens théoriciens apprécient ces unités, car la valeur numérique de la constante de gravitation, de la vitesse de la lumière et de la constante de Planck y est égale à 1.

Johnstone Stoney avait utilisé trois constantes, Planck en utilise trois autres. Un choix est-il plus fondamental que l'autre²⁵ ? Pour répondre à cette question et pour argumenter que le triplet (c, G, h) représente le choix le plus fondamental aux yeux des lois de la Nature, il nous faut caractériser plus précisément ce qu'on entend par constante fondamentale (celle de type C).

Le premier argument en faveur du triplet (c, G, h) est son *rôle de valeur limite* signalant l'apparition de nouveaux phénomènes. Cette

22. – Les unités de Johnstone Stoney sont définies par

$M_J = (e^2/G)^{1/2} = 10^{-7}$ g, $L_J = (Ge^2/c^4)^{1/2} = 10^{-37}$ m ; $T_J = (Ge^2/c^6)^{1/2} = 3 \cdot 10^{-46}$ s.

23. – Pour citer Planck lui-même (*Theory of heat radiation*) : « It offers the possibility of establishing units for length, mass, time and temperature which are independent of specific bodies or materials and which necessarily maintain their meaning for all time and for all civilisations, even those which are extraterrestrial and nonhuman, constants which therefore can be called fundamental physical units of measurement. »

24. – Elles sont données par

$M_P = (hc/G)^{1/2} = 5,56 \cdot 10^{-5}$ g, $L_P = (Gh/c^3)^{1/2} = 4,13 \cdot 10^{-33}$ m ; $T_P = (Gh/c^5)^{1/2} = 1,38 \cdot 10^{-43}$ s.

La signification de ces unités mit longtemps à émerger. La masse de Planck est la masse d'un corps dont le rayon de Compton est égal au rayon de Schwarzschild. Ces unités signalent donc l'échelle où gravitation et mécanique quantique deviennent de même amplitude et sont donc très adaptées à la cosmologie primordiale et à l'étude des trous noirs.

25. – Johnstone Stoney a utilisé la liste (e, G, c) , Planck (h, G, c) . On peut aussi s'amuser à définir un système que l'on peut baptiser de Bohr en utilisant la charge et la masse de l'électron (m_e, h, e) :

$L_B = h^2/m_e e^2$; $T_B = h^3/m_e e^4$, $M_B = m_e$.

Beaucoup d'autres choix sont possibles, ce qui illustre l'arbitraire du choix du système de référence.

caractéristique est liée au rôle que ces trois constantes ont dans la structuration des théories physiques. La constante de Planck est l'unité de moment angulaire et d'action, S , et est associée aux phénomènes quantiques. Quand S/h devient d'ordre unité, cela nous indique que nous ne pouvons plus négliger ces phénomènes et nous satisfaire d'une description classique. La vitesse de la lumière est associée aux phénomènes relativistes. Quand le rapport entre la vitesse d'un corps et la vitesse de la lumière devient d'ordre unité, on doit avoir recours à la relativité restreinte pour décrire la cinématique. La constante de gravitation est plus problématique car elle n'est associée à aucune quantité physique, cependant les théories des hautes énergies nous font penser qu'elle devra être remplacée par une échelle de masse²⁶, telle que la masse de Planck.

Le rôle de structuration des théories physiques est illustré par le « cube des théories physiques »²⁷ présenté figure 2. On peut « allumer » ou « éteindre » une à une les constantes afin de voir comment les théories physiques s'articulent les unes par rapport aux autres. Quand G est mis à zéro, cela revient à supprimer toutes les forces gravitationnelles et à découpler la matière de l'espace et du temps. Quand h est mis à zéro, cela revient à supprimer le caractère quantique de la Nature et à découpler les natures corpusculaires et ondulatoires. Enfin, quand $1/c$ est mis à zéro, la vitesse de la lumière est infinie et le temps et l'espace se découpent l'un de l'autre. Pour visualiser cela, on considère un cube dont les trois axes portent les valeurs de $1/c$, h et G . Chaque sommet du cube représente une théorie physique. Tout naturellement, au niveau le plus bas, on trouve en $(0,0,0)$ la mécanique newtonienne qui ne prend pas en compte les effets relativistes, quantiques et gravitationnels. Au niveau supérieur, où l'on considère l'effet d'une constante, on trouve les trois théories de la relativité restreinte en $(1,0,0)$ de la mécanique quantique en $(0,1,0)$ et de la gravitation newtonienne en $(0,0,1)$, trois théories testées avec une grande précision dans leur

26. – Pour reprendre les mots de Steven Weinberg : « An increasingly popular view (which I share) is that this is not a fundamental constant, but related to an energy scale M_G at which some entirely new physics enters. »

27. – Cette présentation trouve son origine dans une plaisanterie estudiantine de trois futurs grands savants russes, George Gamow, Dimitrii Ivanenko et Lev Landau.

domaine de validité. À un niveau encore supérieur, la théorie quantique des champs en $(1,1,0)$ prend en compte les effets quantiques et relativistes, la relativité générale en $(1,0,1)$ prend en compte les effets gravitationnels et relativistes et la gravité quantique newtonienne en $(0,1,1)$ est censée offrir une description quantique et non-relativiste de la gravitation. Seules les deux premières théories sont actuellement fondées expérimentalement et théoriquement. Au niveau ultime, se trouve la théorie du tout en $(1,1,1)$ censée donner une description quantique et relativiste de la gravitation. Sa formulation n'est pas encore connue, bien que les théories des cordes actuellement intensivement étudiées semblent être des candidats sérieux. Ces théories apparaissent comme des cas limites d'une théorie plus large et plus profonde mais non encore formulée : la théorie M.

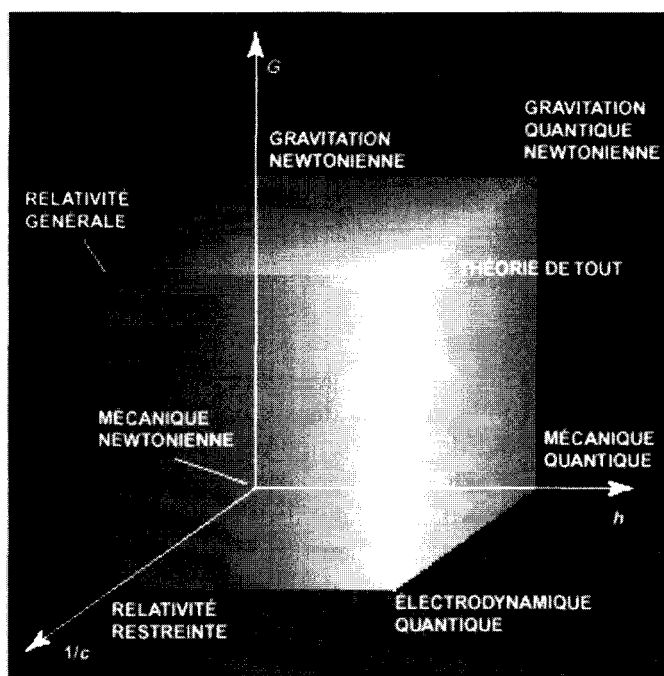


Figure 2. Le cube des théories physiques introduit par Lev Okun (1991) (figure extraite de l'article de J.-Ph. Uzan, *Pour la Science*, 2002).

Le second argument en faveur du triplet (c, G, h) est lié, pour reprendre les mots de Jean-Marc Lévy-Leblond, au rôle de *synthétiseurs de concepts*. Toute théorie physique est à considérer avec son domaine de validité à l'intérieur duquel elle est efficace au niveau explicatif et prédictif. Ce rôle synthétiseur est lié au fait que ces constantes sont aussi des valeurs limite. Les contradictions entre diverses théories préexistantes ne peuvent être levées que par l'introduction de nouveaux concepts englobant des concepts précédemment distincts et mis en relation par la constante (voir, sur la figure 3, le parallèle entre le changement de statut de nos trois constantes et l'émergence de nouvelles théories physiques).

La vitesse de la lumière est à la base de la synthèse entre les concepts d'espace et de temps. Certes, avant la relativité restreinte, les concepts d'espace et de temps existaient, mais ils étaient déconnectés l'un de l'autre. La vitesse de la lumière, par son caractère universel de vitesse limite, a engendré une nouvelle cinématique et permis la genèse du concept d'espace-temps. Avec l'avènement de la relativité, il devient impossible de penser l'espace et le temps de façon indépendante²⁸.

La constante de Planck a joué le rôle de synthétiseur entre les concepts de particules et d'ondes qui ne peuvent, eux non plus, être pensés distinctement. Ces concepts étaient considérés de façon indépendante, jusqu'à ce que la mécanique quantique soit formulée. Pendant longtemps, on a pensé « dualité » jusqu'à ce que l'on comprenne qu'il y avait un concept plus général, qui unifiait les concepts de particule et d'onde : celui de fonction d'onde dont les deux comportements classiques ne sont, en quelque sorte, que des comportements limites. On pourrait mener le même raisonnement avec la constante de gravitation. Avec la formulation de la relativité générale, il devient impossible de penser l'espace-temps et la matière indépendamment. Ces deux concepts deviennent liés par la constante de gravitation dans les équations d'Einstein.

28. – Dans une conférence donnée à Göttingen en 1908, Herman Minkowski conclut : « L'espace lui-même, le temps lui-même, sont condamnés à s'évanouir tels de simples ombres, et seule une sorte d'union des deux préserve une réalité indépendante. »

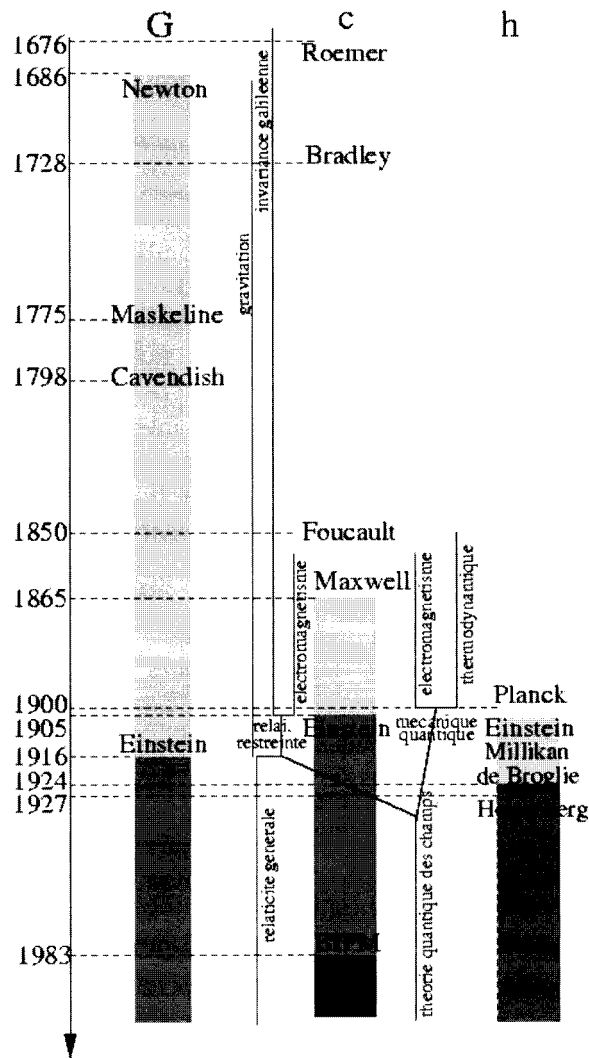


Figure 3. Une mini-biographie des trois constantes fondamentales discutées dans ce texte : la vitesse de la lumière (c), la constante de Newton (G) et la constante de Planck (h). En parallèle sont représentées les synthèses théoriques liées à l'apparition de nouveaux concepts permettant de lever des contradictions entre des théories préexistantes.

On voit que ces trois constantes ont permis la synthèse de concepts féconds et de lier à jamais des aspects qui étaient jusque-là pensés indépendamment. Cela a permis de lever des contradictions apparaissant à la frontière de théories bien testées dans leur domaine de validité et donc de formuler des théories plus générales englobant les précédentes.

En conclusion, il nous fallait trois unités fondamentales, ce qui nous a guidé vers l'existence de trois constantes fondamentales dimensionnées que nous avons ensuite identifiées au triplet (c, G, h) , les seules constantes de type C transversales à toute la physique. En ce sens, nous pouvons affirmer, comme Maxwell et Planck, que les lois de la Nature nous imposent un système d'unités privilégié : *les unités naturelles* (voir la figure 4). On pourrait ajouter un dernier point²⁹ : ces trois constantes entrent à un niveau profond dans la définition de l'espace-temps-matière, que ce soit en liant espace et temps (c), ou espace-temps et matière (G) ou bien en nous imposant des limitations sur sa perception (h et le principe d'incertitude d'Heisenberg).

De nouveau, l'introduction de ces constantes n'est-elle pas un peu arbitraire ? Par exemple, la constante de Planck est-elle le résultat d'une observation, d'une expérimentation ou, plutôt, l'introduction d'une valeur dans un calcul pour qu'une théorie se fonde ?

J'espère que les arguments développés précédemment permettent de conclure que le choix de ces trois constantes n'est en fait pas arbitraire. Cela ne veut pas dire qu'au moment de leur introduction, l'on se soit rendu compte de leur universalité. La figure 2 illustre le changement de statut de chacune des constantes : leur accession à l'ultime catégorie est le résultat d'un long parcours.

29. – Il y a un dernier argument, bien que probablement non convaincant. Les initiales de M. Tomkins, le héros de George Gamow qui explore des mondes où les constantes ont des valeurs différentes par rapport à notre Univers (*M. Tomkins in paperback*, Cambridge University Press, 1949) sont G. C. H !

Puisque la constante de Planck est évoquée, prenons-la en exemple. Son introduction par Planck relève plus d'un acte de désespoir³⁰ qu'autre chose. Il voulait expliquer le spectre du corps noir, un spectre de radiation en équilibre thermique dans une cavité à une température donnée. À l'origine, Planck était un thermodynamicien de renom.

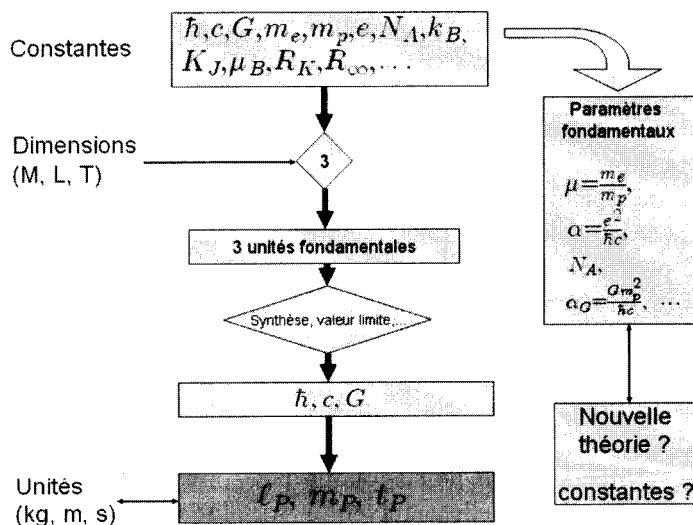


Figure 4. Le lien entre constantes, dimensions et unités. On peut diviser la liste de constantes en deux sous-ensembles : le premier ne contient que des constantes sans dimension (les paramètres fondamentaux) et le second seulement trois constantes fondamentales dimensionnées permettant de construire trois unités pour la longueur, le temps et la masse. Les considérations développées dans le texte nous poussent à considérer la constante de Planck, la constante de gravitation et la vitesse de la lumière comme nos trois constantes fondamentales à partir desquelles nous pouvons construire les unités naturelles de Planck. Les paramètres fondamentaux ont des valeurs indépendantes de tout arbitraire concernant le choix et la réalisation du système d'unité. Les changer revient à changer la physique. On peut espérer formuler une théorie capable de prédire leur valeur et se demander s'ils sont constants à un sens.

30. – Planck avouait lui-même (Armin Herman, *The genesis of quantum Theory*, MIT Press, 1971) : « C'était un acte de désespoir. Pendant six ans, je m'étais battu avec la théorie du corps noir. Je devais trouver une explication théorique à n'importe quel prix, sauf en renonçant au caractère intangible des deux principes de la thermodynamique. »

Pendant six ans, il cherché en vain une solution, jusqu'à ce qu'il fasse une hypothèse sur les échanges d'énergie entre la radiation et la cavité. Il n'en était pas satisfait et pensait que sa constante se réduirait en termes d'autres constantes³¹ dès qu'une théorie de l'interaction entre matière et rayonnement satisfaisante serait formulée. Il fallut attendre 1905 pour que, dans un article révolutionnaire, Albert Einstein affirme que « the energy of [a light ray emitted from a point source] is not distributed continuously over ever-increasing volumes of space but consists of a finite number of energy quanta localised at points of space that move without dividing, and can be absorbed or generated only as complete units. » Il étend la relation de Planck-Einstein ($E = h\nu$) à l'énergie de chacun des quanta de lumière et non plus aux échanges d'énergie avec les atomes de la cavité. Il conclut que le quanta de lumière peut être détecté expérimentalement : c'est l'effet photoélectrique qui sera mis en évidence par Robert Millikan en 1916. Avec Einstein, la constante de Planck devient une caractéristique de la lumière (type B). Ce fut ensuite une trainée de poudre. En 1913, Niels Bohr introduit la constante dans la description des atomes, puis Louis de Broglie en 1923 associe une onde à toute particule de matière : la formule de Planck-Einstein ne s'applique pas simplement à la lumière mais à toute particule ; elle gagne en universalité (type C). De Broglie explicite le lien entre l'action et la constante de Planck, il suggère que la relation entre la mécanique quantique et la mécanique classique est la même qu'entre l'optique de Young-Fresnel et l'optique géométrique. On comprend ainsi le rôle limite de la constante de Planck. Puis, viennent Werner Heisenberg et sa relation d'incertitude qui illustre comment notre connaissance d'un système physique est limitée par la nature quantique du monde. On peut dire qu'à ce moment, la constante de Planck devient transversale à toute la physique, universelle. Actuellement, il est proposé de fixer la valeur de la constante de Planck et d'en dériver la valeur du kilogramme.

31. – Dans une lettre à Paul Ehrenfest en 1905, il confie : « It seems to me completely impossible... h has the same order of magnitude as e^2/c . », et Albert Einstein (*Phys. Zeit.* 10, 1909, 192) continue : « It seems to me that we can conclude from $h = e^2/c$ that the same modification of theory that contains the elementary quantum e as a consequence, will also contain as a consequence the quantum structure of radiation. »

Dès que quelqu'un ose tirer sur un fil, soit par désespoir, soit par curiosité, on se rend compte plus tard que derrière ce fil il y avait toute une bobine que l'on ne peut plus rembobiner. On ne peut plus faire comme si elle n'existait pas. C'est ce qui s'est passé avec nos trois constantes fondamentales.

Les théories s'enchaînent les unes dans les autres et certaines constantes les traversent toutes. Si certaines constantes traversent effectivement les théories qui se succèdent les unes les autres, prenant appui sur la précédente, il ne semble pas que ce soit toujours le cas. En d'autres termes, la question se pose de savoir si toutes les constantes sont vraiment constantes.

L'histoire des sciences le montre, par des théories qui ont tendance à émerger les unes des autres, ou plutôt de la collision des unes avec les autres. Elles ont d'abord été développées de façon indépendante puis, leur domaine de validité s'agrandissant, ont eu des zones de recouvrement donnant naissance à des contradictions. Prenons un exemple : c'est parce qu'il y avait une contradiction entre la description de l'électromagnétisme que Maxwell avait donnée et la cinématique galiléenne qui existait à l'époque qu'il a fallu inventer une nouvelle cinématique, la cinématique relativiste proposée par Albert Einstein. C'est ce que nous avons illustré sur la figure 3.

Comment puis-je justifier ou m'assurer que les quantités que j'ai introduites sont véritablement des constantes, c'est-à-dire ne dépendent pas de la position dans l'espace et dans le temps ? Comme nous l'avons souligné précédemment, supposer que ces quantités sont constantes est une sorte d'argument du pauvre. Je ne connais pas les équations qui dictent leur évolution et je ne connais pas de constantes plus fondamentales me permettant de déduire leur expression. Alors, je les suppose constants.

Est-ce justifié ? *A priori* non. Une forte activité expérimentale existe autour de cette question. L'hypothèse que la valeur des constantes est

indépendante de l'espace et du temps nous semble intuitivement couler de source et est à la base de toute démarche expérimentale. En effet, si les électrons n'avaient pas la même charge et la même masse, serait-il possible de reproduire et de comparer des expériences effectuées en des lieux et des époques différents ? Une variation importante serait en contradiction flagrante avec l'expérience. On cherche donc des effets fins.

Avant d'aller plus loin, il faut souligner un point important : on ne peut pas mesurer la variation de n'importe quelle constante. C'est un peu délicat à expliquer, mais ce point est lié à ce que signifie « mesurer ». Faisons une petite expérience de pensée. Supposons que je veuille me peser. Je monte sur une balance et j'obtiens 75 kilogrammes. Pour savoir si mon poids varie, je refais l'expérience le lendemain. Je me pèse de nouveau avec la même balance et j'obtiens 77 kilogrammes. Que dois-je en conclure ? La plupart des gens penseront qu'ils ont grossi de 2 kilogrammes, mais le physicien va penser différemment. Quand je me mesure deux fois de suite, je compare ma masse à une certaine masse de référence. Peut-être est-ce la masse test qui a diminué, peut-être est-ce un effet concomitant des deux masses : on ne peut pas savoir. Pour être sûr qu'une constante dimensionnée a varié, il faut s'assurer que le système de référence n'a pas varié, hypothèse que l'on ne peut pas vérifier.

Le seul fait expérimentalement accessible est de regarder si des constantes sans dimension ont varié. Je peux toujours dire que le rapport entre ces deux masses était plus grand hier qu'aujourd'hui. Cela a un sens. Quand je parlerai de variations de constantes, j'entendrai *toujours* variations de constantes sans dimension.

On peut se demander : pourquoi regarder si les constantes sont constantes ? D'une certaine façon, est-ce que cela n'est pas une façon de se poser des questions absurdes ?

Heureusement, cela ne paraît absurde qu'en apparence et nous avons déjà expliqué pourquoi. Ces paramètres sans dimension (ceux de

la deuxième liste de mon classement précédent) sont les seuls non prédits par ma théorie. Je ne peux, dans le cadre de cette théorie, que les mesurer. Si je veux les comprendre, je dois formuler une théorie plus générale dans laquelle certains de ces paramètres sont des quantités dynamiques. En étudiant leur dynamique, je pourrais peut-être comprendre pourquoi, dans le domaine de validité de mon ancienne théorie, il était possible de les considérer comme constants. Les constantes me signalent les limites de ma théorie. Leur statut de constante est un peu comme un fil que l'on peut tirer en espérant que la théorie plus générale se déroulera.

Cela n'explique toujours pas pourquoi ces constantes peuvent varier.

Tout à fait. Il existe cependant de bonnes motivations théoriques pour cela. Je vais en donner deux qui sont reliées, mais avant cela faisons une petite digression historique.

L'hypothèse de constance a une portée beaucoup plus profonde. La compréhension de notre Univers et la construction du modèle cosmologique repose sur l'application de lois physiques locales à l'Univers en tant que système. Cependant, l'unicité de l'Univers observable implique qu'il est impossible de distinguer entre conditions aux limites et physique locale. Ainsi, ce qui semble être une loi physique « inviolable » ne pourrait en fait refléter que des conditions (aux limites) particulières à notre Univers. Malheureusement, cette hypothèse ne peut être testée car nous n'avons pas accès à d'autres Univers et nous ne pouvons pas réinitialiser le nôtre. En revanche, on peut postuler que si l'Univers était différent, certaines lois de la physique seraient différentes. Cela mena, sous l'influence de Paul Dirac, à l'idée que l'Univers étant en évolution, les lois de la physique, et en particulier les constantes qui interviennent dans ces lois, pourraient changer avec lui. La question fut donc initialement soulevée en 1937 par Paul Dirac et son hypothèse des grands nombres. Dans cette théorie, qui est davantage un argument numérolgique qu'une théorie, Dirac exprime l'argument esthétique que des constantes numériques très grandes ou très petites ne peuvent pas

apparaître dans les lois de la physique. Elles seraient plutôt des paramètres variables dont la valeur caractérise l'état de l'Univers. Dans ce cadre, Dirac proposa que la constante de gravitation varie avec le temps (comme l'inverse de l'âge de l'Univers). Encore une fois, soulignons que cela n'a de sens que si l'on précise quelles quantités restent fixes. Dans le cas de Dirac, la charge et la masse de l'électron ne bougent pas, de telle sorte que le système d'unités est celui de Bohr, alors que le système de Planck dépend du temps. Il fut démontré très rapidement qu'un tel modèle était exclu par les observations astrophysiques, comme par exemple la durée de vie du Soleil. La question n'en est pas moins restée.

La première motivation est que tester l'hypothèse de constante est en fait un test de notre théorie de la gravitation : la relativité générale. L'hypothèse que la valeur des constantes ne dépend pas de l'espace et du temps prend sa véritable dimension quand Albert Einstein postule le *principe d'équivalence d'Einstein*³² sur lequel repose la construction de la théorie de la relativité générale. Dans ce cadre, toutes les constantes doivent être strictement constantes. Il s'ensuit que si la valeur des constantes dépendait de l'espace et du temps, le principe d'invariance de position locale serait violé, et donc le principe d'équivalence d'Einstein. Il y a donc un lien intime entre cette hypothèse et la loi de la gravité que nous utilisons aujourd'hui, la théorie de la relativité générale.

Il y a pire : on peut montrer que si les constantes varient, alors le principe d'universalité de la chute libre (le fait que, dans le vide, tous les objets tombent avec la même accélération), pilier des théories de la gravitation depuis Galilée, ne peut être valable qu'à un certain niveau de précision. Voici pourquoi : si, par exemple, la constante de structure fine évoluait dans le temps et dans l'espace, l'énergie de liaison électromagnétique responsable de la cohésion d'un corps varierait. La masse de tout objet changerait avec sa position. En vertu du principe de conservation de l'énergie, un corps dont la masse varierait d'un point à l'autre

32. – Ce principe d'équivalence regroupe trois hypothèses : l'universalité de la chute libre, l'invariance de position locale et l'invariance de Lorentz locale.

de sa trajectoire accélérerait en se déplaçant vers une zone où sa masse diminue (ou décélérerait dans le cas inverse). De plus, comme l'énergie électromagnétique du proton est différente de celle du neutron, cette variation de masse dépendrait de la proportion de protons et de neutrons contenus dans un objet et, par conséquent, serait différente pour des corps de diverses compositions chimiques. Autrement dit, les corps en chute libre dans l'espace subiraient une nouvelle force dépendant de leur composition. J'arrive à la même conclusion si c'est le rapport de la masse de l'électron à la masse du proton qui varie, ou tout autre constante. Cela n'est pas anodin, puisqu'aujourd'hui on teste la théorie d'Einstein dans le système solaire avec une très grande précision³³. Tester la constance des constantes permet d'étendre ces tests de la relativité générale à des échelles astrophysiques³⁴. En effet, en utilisant des spectres d'absorption par des nuages interstellaires qui s'interposent entre nous et des quasars lointains, on peut avoir accès à des (paléo)-spectres atomiques qui nous permettent de mesurer la valeur de certaines constantes comme la constante de structure fine et le rapport entre les masses du proton et de l'électron dans un passé lointain. Il semblerait que la constante de structure fine ait varié au cours de l'histoire cosmologique ; elle aurait été plus faible dans le passé. Toutefois, ces observations sont encore à prendre avec des pincettes. L'état de l'art concernant les contraintes sur la variation de la constante de structure fine est représenté sur la figure 5. Diverses méthodes donnent accès à des échelles de temps différentes : montres atomiques en laboratoire, réacteur naturel de la mine d'Oklo, désintégration bêta, spectre de quasars, fond diffus cosmologique et nucléosynthèse primordiale.

La seconde motivation est plus théorique et vient de la théorie des cordes, le meilleur candidat que nous ayons actuellement pour unifier les théories quantiques et la gravitation, et/ou de l'existence de dimensions

33. – Le principe d'équivalence est testé avec une précision de 10^{-13} et sera testé avec une précision de 10^{-15} par le satellite Microscope de l'ESA en 2004 (voir <http://sci2.esa.int/Microscope>).

34. – D'autres méthodes visant à tester la loi de Poisson aux échelles astrophysiques en utilisant les effets de lentilles gravitationnelles ont récemment été proposées. Voir J.-Ph. Uzan et F. Bernardau, *Lensing at cosmological scales : a test of higher dimensional gravity*, *Phys. Rev. D* 64, 2001, 083004 et F. Bernardau et J.-Ph. Uzan, *Tester la gravité aux échelles cosmologiques*, *Dossier Pour la science* 38, janvier 2003, page 65.

d'espace supplémentaires. Les constantes fondamentales de ces théories sont des constantes définies dans un espace de plus haute dimensionnalité. La physique que nous observons est cependant quadri-dimensionnelle et les constantes qui apparaissent dans la théorie effective peuvent s'exprimer en fonction des « vraies » constantes et du volume des dimensions supplémentaires³⁵. Une autre prédiction établie de ces théories des cordes est l'existence d'une particule, le dilaton, qui

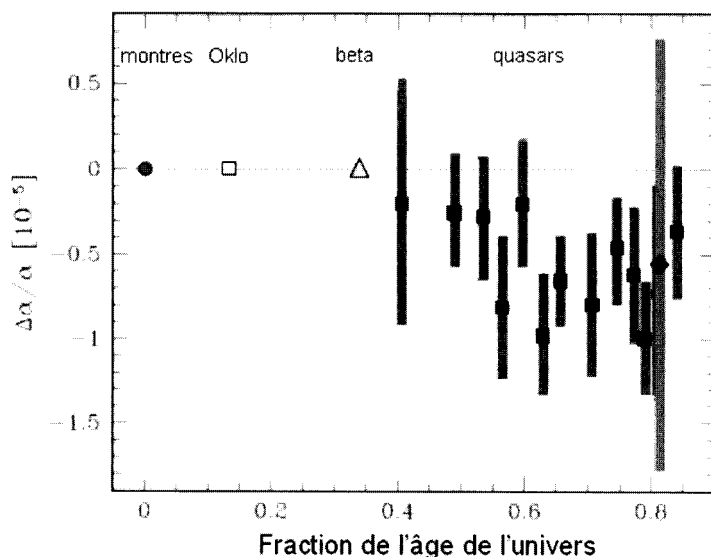


Figure 5. Contraintes sur la variation temporelle de la constante de structure fine. Les résultats des expériences utilisant des montres atomiques (rond rouge), le réacteur naturel de la mine d'Oklo (carré), de la désintégration bêta du rhénium (triangle), des mesures de spectres atomiques dans les spectres d'absorption de quasars sont représentés.

35. – Prenons un exemple : si je veux décrire un capillaire, un petit tube fin et creux, de loin, je vois un fil que je vais pouvoir décrire par sa longueur et sa tension. Si, maintenant, je regarde ce même capillaire au microscope, je vois un petit tube et j'aurai tendance à le décrire par son rayon, sa longueur et non plus sa tension mais sa tension de surface puisque, maintenant, je vois la surface du capillaire. Je peux alors relier la structure macroscopique à la structure microscopique. Ce que j'appelais la tension, qui était la constante dans ma description macroscopique, va s'exprimer en fonction du rayon et de la tension de surface qui sont les paramètres microscopiques. Certaines constantes que l'on a aujourd'hui sont des constantes effectives de notre monde à quatre dimensions et peuvent s'exprimer en fonction de constante de la théorie de plus grande dimensionnalité et du volume des dimensions supplémentaires.

interagit avec la matière ordinaire. Les détails de son interaction varient d'une version de la théorie des cordes à l'autre. Ce dilaton est un champ scalaire, c'est-à-dire une particule de spin 0, analogue au boson de Higgs. Au dilaton, est associée une force à longue portée qui dépend de la composition.

Le volume des dimensions supplémentaires et le dilaton sont des quantités dynamiques pouvant varier dans le temps et l'espace. On s'attend donc à ce que nos constantes effectives à quatre dimensions varient aussi. En testant l'hypothèse de constance de ces constantes, on ouvre une petite fenêtre sur de telles théories qui sont des extensions de la relativité générale. La gravitation n'y est plus décrite simplement par les effets de la géométrie de l'espace-temps mais aussi par un champ scalaire qui induit à la fois une déviation par rapport aux prédictions de la relativité, une violation de l'universalité de la chute libre et une variation des constantes de la Nature. Malheureusement, la dynamique de ce champ scalaire et des dimensions supplémentaires n'est pas encore complètement comprise. Dans ce cadre, la question n'est pas de savoir si les constantes sont constantes mais plutôt de comprendre pourquoi elles varient si peu³⁶ !

Voilà deux grandes motivations des recherches actuelles sur les constantes de la Nature. Pour conclure, prenons un petit envol cosmologique. Les observations cosmologiques modernes nous poussent à conclure que l'expansion de l'Univers est en train de s'accélérer. Ce fait n'est pas anodin et, s'il est confirmé, il est à lui seul une preuve de nouvelle physique. En effet, on ne peut pas obtenir une telle accélération dans le cadre relativiste avec de la matière ordinaire. L'approche classique est d'introduire de la matière exotique (avec une pression négative) sous la forme d'une constante cosmologique ou d'un champ scalaire. Dans ce cas, ce champ se couple *a priori* à la matière ordinaire et devrait être accompagné d'une variation des constantes³⁷. Une autre possibilité moins explorée est de modifier la théorie de la gravitation.

36. – Voir T. Damour et A. M. Polyakov, *Nucl. Phys. B* 423 (1994) 532.

37. – Voir T. Damour, F. Piazza et G. Veneziano, *Phys. Rev. Lett.* 89 (2003) 081601.

Le cadre de la théorie des cordes où toute constante sans dimension est liée à la valeur d'un champ dynamique offre aussi la possibilité de comprendre pourquoi les constantes sans dimension ont la valeur qu'elles ont. Associée au modèle d'inflation éternelle, elle offre la possibilité de penser une distribution des constantes de la physique sur des échelles cosmologiques, voir des lois de la physique elles-mêmes si d'une bulle inflationnaire à l'autre le « vide » de la théorie des cordes a été sélectionné de façon différente. Avec le principe anthropique, voilà un cadre permettant d'aborder des questions tenant plus de la métaphysique que de la physique mais qui nous font mesurer la particularité de notre Univers local.

Remerciements

Je tiens à remercier René Cuillierier, Nathalie Deruelle, George Ellis, Gilles Esposito-Farèse, Roland Lehoucq, Christophe Salomon et Gabriele Veneziano, pour les nombreuses discussions concernant les constantes de la physique et leur signification, Thibaut Damour pour les clarifications sur leur possible variation. Je remercie Gilles Cohen-Tannoudji de m'avoir offert l'opportunité de participer à ces rencontres et pour nos trop brèves discussions concernant le statut de la constante de Boltzmann. Le sujet de cette contribution est développé dans l'ouvrage *Les constantes fondamentales* (R. Lehoucq et J.-Ph. Uzan, à paraître aux éditions Belin en 2004) qui présente un choix de textes fondateurs liés à l'apparition, la compréhension et la mesure des constantes fondamentales. Un grand merci à mon fils, Yakov, qui m'a judicieusement fait redécouvrir la référence incontournable concernant la détermination de la taille du pied d'Héraclès !

Trois unités fondamentales : un autre choix est-il possible ?

Diverses propositions ont été avancées :

1. Qu'il n'y a pas de constantes fondamentales dimensionnées. Elles ne seraient que des coefficients de conversion dus à des pesanteurs historiques dans la définition des unités. En particulier on peut toujours choisir $c = G = h = 1$;
2. que deux constantes dimensionnées suffisent ;
3. que d'autres constantes sont à ajouter à la liste, en particulier la constante de Boltzman.

Sans rentrer dans les détails de l'argumentation, il me semble que ces trois approches ne sont pas satisfaisantes pour diverses raisons.

1. Poser $c = G = h = 1$ revient en fait à choisir un système d'unités particulier, le système de Planck. Ce qui est fondamental dans une constante, ce n'est pas sa valeur numérique, la changer revient à choisir des systèmes d'unités différents. Le lien créé par la constante entre deux concepts distincts subsiste. Ainsi, on peut supposer que la vitesse de la lumière est un simple facteur de conversion entre unité d'espace et de temps qui peut disparaître si on décide de mesurer les distances en seconde-lumière. Il n'en est rien car les deux concepts de temps et d'espace n'en restent pas moins différents. Dans le cadre relativiste, cela s'exprime à travers la nature pseudo-euclidienne de l'espace-temps. Il en est de même pour la constante de Planck. Supposer qu'énergie et pulsation sont mesurées dans les mêmes unités ne permet pas de réduire la nature corpusculaire de la matière à sa nature ondulatoire. Même si deux concepts ont été unifiés, ils n'en deviennent pas moins identiques. En posant la constante de Planck comme unité, on obtiendrait une relation entre énergie et fréquence qui serait $E = ?$. Or, ces deux quantités physiques sont différentes. L'énergie est une quantité extensive, ce qui n'est pas le cas des pulsations qui ne peuvent pas être additionnées. Elle n'est définie qu'à une constante additive près, ce qui n'est pas le cas des pulsations, les pulsations peuvent avoir une valeur maximale due à une possible structure microscopique de l'espace-temps, alors que l'énergie peut être aussi grande que voulue. D'autres part, si toutes les constantes étaient de simples facteurs de conversion, il n'y aurait aucune longueur fondamentale et la physique serait invariante par changement d'échelle : les atomes n'auraient pas de taille caractéristique. Il serait aussi impossible de parler de petites et grandes distances, de petites et grandes vitesses. En conclusion, il semble commode

à un point de vue théorique de supposer que toutes les constantes sont des facteurs de conversions. Cela revient juste à travailler en unités naturelles de Planck. D'un point de vue pragmatique et expérimentale, cette attitude est aussi catastrophique.

2. La théorie des cordes offre des horizons nouveaux pour les constantes. Ainsi, toutes les constantes sans dimension y deviennent des quantités dynamiques. Cela laisse envisager la possibilité de développer une physique des constantes et de comprendre pourquoi elles ont les valeurs observées. Reste la question des constantes dimensionnées. Gabriele Veneziano a avancé l'argument que seulement deux constantes dimensionnées semblent nécessaires dans ce cadre. Pour une corde, on peut identifier son énergie à sa longueur, ce qui n'est pas le cas pour des objets ordinaires tels que des atomes. Cependant, étant donné que pour les objets ordinaires, les concepts de quantités de mouvement et d'énergie sont distincts de ceux de longueurs et de temps (qui sont leurs variables conjuguées canoniques), utiliser les mêmes unités est (pédagogiquement) confus. Dans ce cadre de la théorie des cordes, il ne semble pas nécessaire d'introduire une tension T pour la corde ou une constante de Planck. Cette dernière est d'une certaine façon promue au rôle de coupure ultraviolette. Une telle approche peut être confuse pour des objets ordinaires. De plus, si l'on se restreint aux cadres des théories testées expérimentalement, il nous est nécessaire de considérer trois constantes.
3. Pourquoi ne pas considérer la constante de Boltzmann, k , qui permet de faire le lien entre les concepts d'énergie et de température, ($E = kT$) ? Il y a plusieurs raisons à cela. D'une part, comme la métrologie nous l'a appris, seules trois dimensions sont nécessaires pour caractériser toutes les quantités physiques connues. La découverte d'une nouvelle unité signifierait la découverte de nouvelles quantités physiques et donc d'un élargissement de notre cadre théorique. En ce qui concerne la constante de Boltzmann, les concepts de température et d'énergie ne sont en fait pas distincts. La température caractérise l'énergie cinétique moyenne d'un ensemble de particules. La constante de Boltzmann fait donc le lien entre deux concepts physiques identiques exprimés dans des unités différentes seulement pour des raisons historiques. La théorie cinétique des gaz a permis de comprendre le concept de température et de le réduire à des concepts microscopiques. Le rôle de la constante de Boltzmann est donc différent de celui de la constante de Planck par exemple. La température est mathématiquement définie comme la dérivée de l'énergie interne d'un système par rapport à son entropie $T = dU/dS$. Introduire k revient à introduire un facteur de conversion arbitraire relié à l'existence d'une dimension pour l'entropie. Aucune quantité physique, sauf

l'entropie, n'a les dimensions de la constante de Boltzmann. Notons que Landau et Lifschitz introduisent l'entropie sans dimension dans leur cours de physique théorique. On pourrait supprimer le Kelvin et k sans affecter la métrologie. Il suffirait pour cela de redéfinir la température comme kT et de redéfinir l'entropie comme S/k . Avec ces redéfinitions, la constante de Boltzmann n'apparaîtrait plus dans aucune loi de la physique. k ne joue pas le rôle de valeur limite au-delà de laquelle de nouveaux phénomènes physiques apparaissent. La faire tendre vers 0, la constante R étant fixée, revient à considérer des systèmes physiques avec des nombres de particules tendant vers l'infini. Il est donc légitime de considérer la constante de Boltzmann comme un facteur de conversion entre deux unités qui étaient distinctes avant que l'on comprenne qu'elles recouvraient le même concept. Cette conclusion est renforcée par système SI où N , k et le Kelvin sont déconnectés de toutes les autres unités (voir figure 1). En conclusion, l'addition de la constante de Boltzmann, ou de toute autre constante dimensionnée, à notre liste de constantes (dimensionnées) fondamentales semble superflue.

Bibliographie

G. Cohen-Tannoudji, *Les constantes universelles*, Paris, Hachette, Collection « Questions de sciences », 1995.

M. Duff, L. Okun, et G. Veneziano, *Dialogue on the number of fundamental constants*, *JHEP* **03**, 2002.

G. F. R. Ellis et J.-P. Uzan, '*c*' is for the speed of light, isn't it?, *Phys. Rev. D* (in press).

R. Lehoucq et J.-Ph. Uzan, *Les constantes fondamentales*, Paris, Belin, 2004 (à paraître).

J.-M. Levy-Leblond, *The importance of being (a) constant*, Enrico Fermi School LXXII (North Holland, 1979).

L. Okun, *The fundamental constants of physics*, *Sov. Phys. Usp.* **34**, 1991, 818.

B. Taylor, *The international system of units*, NIST special publication 330, 2001.

J.-Ph. Uzan, The fundamental constants and their variation : observational and theoretical status, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 2003, 403.

J.-Ph. Uzan, Tests of gravity on astrophysical scales and variation of the constants, *Ann. Henri Poincaré* **4**, 2003, 321-344.

J.-Ph. Uzan, Les constantes varient-elles ?, *Pour la science* **297**, 2002, 72.

LES NOUVELLES DIMENSIONS DE L'UNIVERS

Pierre Binétruy*

Françoise Balibar a inauguré cette série d'entretiens en intitulant sa contribution : « Le réel a toujours eu quatre dimensions ». Cela sous entend, bien sûr, que par les progrès de la connaissance, on est arrivé à identifier ainsi ce qu'il est convenu de nommer le réel et d'élaborer une théorie fondée sur ces acquis. En effet, l'Univers n'a pas attendu l'homme pour avoir quatre dimensions. Cela dit, les avancées actuelles en suggèrent un plus grand nombre. Pour mieux comprendre de quoi il retourne, un préalable s'impose : que cache le mot « dimension » ?

Sous la dénomination de « dimension » se cachent des faits de la vie de tous les jours. Donner les dimensions d'une valise, c'est fournir sa hauteur, sa largeur et sa longueur : il suffit de trois cotes pour repérer un point dans notre espace visuel. L'espace directement accessible à nos sens peut se définir avec simplement trois nombres : trois axes que l'on peut aisément imaginer constituer ces dimensions, dites dimensions

* Professeur à l'Université Paris VII– Denis Diderot, Laboratoire Astroparticule et Cosmologie, Paris VII et Laboratoire de Physique Théorique de l'Université Paris-Sud, Orsay.

d'espace. Alors, pourquoi parler de quatre dimensions pour repérer un point dans cet espace ? Parce que le temps joue aussi un rôle de dimension. Si je veux préciser où est ma valise sur le tapis roulant de l'aéroport, je dois préciser à quel moment. Le temps joue toutefois le rôle d'une dimension spéciale, puisque, sauf dans les livres de science-fiction, on ne peut pas remonter dans le temps. Pour décrire cela, on parle parfois de la flèche du temps : il n'y a qu'une dimension temporelle et elle est orientée. À l'inverse, il n'y a pas de flèche de l'espace : je peux à ma guise avancer ou reculer de trois pas dans l'espace, ou encore marcher en rond.

Trois dimensions d'espace, une dimension du temps, et d'autres dimensions qui, elles, ne se définissent pas par les mêmes critères. Quelle que soit la nature de toutes ces autres dimensions, comment les « mesurer », si elles ne sont pas mesurables en centimètres ou en secondes ?

Pour expliquer ce que sont ces dimensions supplémentaires, l'exemple du fildefériste fournit une image utile. Le fildeférististe qui se promène sur son fil n'a qu'une seule dimension d'espace à sa disposition. Il va en avant ou en arrière sur son fil. Il n'a pas intérêt à faire un pas vers la droite ou vers la gauche, sinon il va réaliser à ses dépens qu'il ne dispose pas des autres dimensions. Le physicien dira que le fildeférististe dispose d'une dimension d'espace et, évidemment, d'une dimension temporelle : le temps coule pour lui comme pour tout le monde.

Une fourmi, qui se déplacerait sur le même fil, se rendrait compte immédiatement qu'il n'y a pas une mais deux dimensions spatiales : elle peut faire le tour complet du fil et la distance qu'elle parcourt ainsi est une mesure de la taille de cette dimension supplémentaire qui lui est accessible. Imaginons que l'on rétrécisse le diamètre du fil jusqu'à le rendre microscopique : une fourmi microscopique aura conscience de la dimension supplémentaire grâce à sa taille microscopique ; en revanche, le fildeférististe ignorera tout de cette dimension. C'est la question que posent les physiciens : quand nous pensons être dans un

espace à trois dimensions, nous sommes en réalité peut-être sur un « fil de fer » tridimensionnel qui a beaucoup d'autres dimensions qui nous seraient accessibles si nous étions microscopiques. Leurs tailles ne se compteraient pas en centimètres, puisqu'il s'agirait de tailles microscopiques, pas même en microns, mais en unités de mesure subatomiques.

Comment la physique en est-elle arrivée à soulever la question de toutes ces autres dimensions ?

C'est un vieux rêve de physicien, en particulier au ^{xx}e siècle, d'unifier les différentes forces fondamentales. Albert Einstein rêva de réaliser une unification entre la force gravitationnelle et la force électromagnétique. Dans les années 1920, deux physiciens, en fait un physicien et un mathématicien, Kaluza et Klein, ont l'idée, « saugrenue » à l'époque, d'introduire une quatrième dimension d'espace (et donc un espace-temps à cinq dimensions). C'est un peu difficile à imaginer, mais de cette façon, l'introduction de cette dimension supplémentaire leur permettait de réaliser une unification géométrique entre la force de gravitation et la force électromagnétique. Einstein l'a su rapidement et il en a été vivement intéressé, au moins pendant un certain temps. Il se trouve que cette unification prédisait l'existence d'une particule qui n'a pas été observée, alors l'idée est un peu tombée dans l'oubli. Elle a refait surface dans les années 1970, quand on a essayé d'unifier, cette fois, l'ensemble des forces (interactions) fondamentales, sous la dénomination de « théorie des cordes ». On s'est alors aperçu de nouveau qu'il fallait introduire plus de quatre dimensions d'espace-temps.

La « théorie des cordes » envisage d'unir les quatre grandes forces fondamentales. On parle aussi de supercordes. Quelle différence y a-t-il, d'un point de vue théorique, entre corde et supercorde ?

Selon cette théorie, des cordes seraient les entités fondamentales. Le physicien des particules a l'habitude de dire que les objets fondamentaux

sont des particules élémentaires, objets ponctuels. On a vécu sur cette idée pendant la majeure partie du xx^e siècle. Elle a d'ailleurs permis d'unifier la compréhension de la force électromagnétique d'un côté et des forces qui régissent le monde microscopique de l'autre : la force faible et la force forte. Cependant, quand la question fondamentale s'est posée – se pose toujours à nous, d'ailleurs – de l'unification avec la force gravitationnelle, qui décrit entre autres l'évolution de l'Univers, il a fallu revoir la copie. Il s'agissait en effet d'accorder deux des théories fondamentales qui ont façonné la physique du xx^e siècle : la mécanique quantique, qui régit les lois de la physique microscopique, et la relativité générale qui régit les lois de la gravitation et donc de l'évolution de l'Univers. En termes un peu simplistes, unifier la physique de l'infiniment petit et celle de l'infiniment grand. Ces deux théories, véritables legs de la physique du xx^e siècle, présentent de grandes difficultés de ce point de vue. On a beaucoup de mal – on le sait depuis Einstein – à trouver un schéma unificateur qui intégrerait ces deux théories dans une théorie unique. Il est donc probable que la théorie qui réalisera l'intégration de ces deux théories sera conceptuellement novatrice. La théorie des cordes ou des supercordes – je vais revenir sur la différence – considère que les objets fondamentaux ne sont pas ponctuels mais sont, en fait, des objets à une dimension qu'on nomme familièrement cordes. L'image est simple, mais il faut comprendre que ce sont des entités ultra-microscopiques, en fait les objets les plus fondamentaux. Maintenant, quand on parle de supercordes, on ajoute un concept, celui de supersymétrie : une symétrie qui permet, pour faire simple, de stabiliser ces objets que sont les cordes.

Quand on entend parler de cordes microscopiques, on imagine des espèces de petites choses plus ou moins recourbées. Comme on a entendu parler du caractère à la fois particulaire et ondulatoire de la matière, on se demande si les cordes n'en seraient pas une représentation.

La dualité entre onde et particule introduite par la mécanique quantique avec de Broglie est *a priori* d'une autre nature. Ici, les particules, que ce soit particule de matière ou particule de lumière (photon), apparaissent

sous la forme de mode d'oscillation de ces cordes fondamentales. Prenons l'exemple d'une corde de violon : même si l'instrument est dans la pièce d'à côté, vous allez reconnaître qu'il s'agit d'un instrument à cordes. Les sons vous parviennent et, à partir des sensations physiques associées à ces sons, vous allez identifier la corde de violon. D'une certaine façon, les particules seraient les notes que nous joueraient ces cordes si microscopiques que le meilleur microscope ne pourrait pas nous permettre de les visualiser. Dire « note » peut paraître abstrait ou métaphorique, mais un son est une forme d'énergie, l'énergie des modes de compression de l'air qui se propagent jusqu'à nos oreilles. Le physicien dirait, à propos de ces cordes microscopiques, qu'une énergie caractéristique est associée à chacun de leurs modes d'oscillation. Chacun de ces modes est interprété comme une particule et l'énergie associée est la masse de ces particules (selon la fameuse relation masse-énergie d'Einstein).

Le rapprochement des deux grandes théories doit conduire à la conception unique, incluant l'univers quantique et l'univers relativiste.

La relativité est une théorie géométrique. L'approche quantique est probabiliste. C'est une des sources des difficultés rencontrées pour réconcilier les deux théories. Que serait un univers quantique, un espace-temps quantique ? Un univers quantique serait un univers dont la géométrie fluctuerait au gré des lois de la physique quantique. Il est probable que les lois de la physique quantique ont été déterminantes dans l'évolution de l'univers très primordial, c'est-à-dire très proche du Big Bang. Que pouvait bien signifier une distance entre deux points dans un univers régi par les lois de la physique quantique ? C'est ce genre de questions pour lesquelles on n'a pas encore de réponse. Il est aussi possible que les lois de la physique quantique ne s'appliquent pas au-delà du microscopique. La théorie des cordes fait le pari contraire et cherche à établir le lien entre échelles microscopiques subatomiques et échelles macroscopiques à la dimension de l'Univers. Il nous reste presque tout à comprendre dans cette dualité entre infiniment grand et infiniment petit.

L'univers quantique est fluctuant. Dans l'univers dans lequel nous vivons, nous ne sentons pas trop de fluctuations, à part celles de la météorologie. Il faut donc penser que si l'unification des deux Univers est réalisée dans les faits, c'est l'explication qui manque. Est-ce pour cela que la physique contemporaine fait appel à d'autres dimensions ?

Nous n'observons pas les fluctuations quantiques parce que nos sens opèrent à l'échelle macroscopique, mais ces fluctuations jouent un rôle essentiel par exemple dans un accélérateur de particules comme celui du CERN à Genève où l'on sonde la matière à des distances submicroscopiques.

On ne comprend pas vraiment pourquoi il faudrait nécessairement faire appel à des dimensions supplémentaires pour résoudre le hiatus entre relativité générale et mécanique quantique. On peut simplement constater que la théorie des cordes semble résoudre le problème et qu'elle est définie dans un nombre précis de dimensions, 10 ou 11 (ou 26 pour certaines théories non supersymétriques). Pourquoi 10 ou 11 ? Bien difficile de donner un argument simple. Disons seulement que c'est une question de cohérence interne de la théorie. On arrive à écrire une théorie cohérente uniquement avec 10 ou 11 dimensions.

Comment observe-t-on ces dimensions ?

Il est difficile de se représenter ces dimensions supplémentaires. Reprenons l'exemple de la valise avec ses trois dimensions et imaginons une valise infiniment haute, mais de largeur et d'épaisseur microscopiques. Ce pourrait être une image d'un monde multidimensionnel : la hauteur serait la représentation d'une de nos dimensions usuelles (il y en a en fait trois), la largeur et l'épaisseur la représentation des dimensions supplémentaires (il y en a probablement plus de deux). Nous voyons que l'espace-temps est en quelque sorte assimilable à une boîte, au moins dans ses dimensions supplémentaires, une boîte multidimensionnelle. Or considérer dans cette boîte une particule, c'est, d'après la

mécanique quantique, considérer une onde avec des modes propres (qu'il ne faut pas confondre avec les modes propres d'oscillation de la corde de tout à l'heure). De même qu'en musique on distingue la fondamentale et les harmoniques, on va distinguer dans cette boîte multidimensionnelle des modes fondamentaux et des modes harmoniques, et des particules associées à chacun de ces modes. Prenons par exemple les modes d'un « électron » multidimensionnel : le fondamental est l'électron que nous connaissons bien dans notre espace-temps à quatre dimensions et les harmoniques sont des particules qui ont les mêmes propriétés que l'électron (même charge) mais une masse (c'est-à-dire une énergie) beaucoup plus élevée. Les particules usuelles vont donc avoir des répliques lourdes qui correspondent à ces modes harmoniques dans cette boîte multidimensionnelle qu'est l'univers avec dimensions supplémentaires. Ces répliques sont dénommées modes de Kaluza-Klein en référence aux deux précurseurs dont j'ai parlé. Elles ont pour signature d'avoir un spectre de masse fixé par des nombres entiers (de même que la fréquence des modes harmoniques est un nombre entier fois la fréquence du fondamental).

On espère bien observer cela dans un accélérateur. Dans une collision à très haute énergie, on identifierait par exemple une particule ayant les mêmes propriétés que l'électron, une sorte d'électron lourd, le premier mode de Kaluza-Klein de l'électron. En allant vers des énergies encore plus élevées, on observerait un « électron » encore plus lourd, le second mode de l'électron... On peut penser que l'accélérateur LHC du CERN, qui va fonctionner dès 2007 à des énergies encore jamais atteintes, permettra de telles découvertes.

D'une part, la théorie élabore la nécessité de plusieurs autres dimensions, d'autre part, les accélérateurs de particules manifestent des observations qui permettent d'inférer indirectement leur existence.

Comme souvent dans ce type de physique, la mise en évidence de nouveaux concepts est relativement indirecte. Il ne s'agit pas d'ouvrir

une porte pour se retrouver dans des dimensions supplémentaires. On évolue dans ce qu'on appelle communément l'infiniment petit, un monde où nos cinq sens sont de peu d'utilité. Pour le profane, la mise en évidence semble alors un mystère. Mais, le jour où le physicien va « voir » dans son détecteur ces particules de K-K, il saura qu'une voie vers des dimensions supplémentaires d'espace-temps vient effectivement de s'ouvrir.

Ces nouvelles particules de K-K ont-elles une incidence sur la loi de la gravité ?

La loi de la gravité, en particulier la variation de la force gravitationnelle avec la distance, dépend en principe du nombre de dimensions d'espace. Toutefois, si ces dimensions sont microscopiques, on ne s'apercevra de rien à notre échelle. Il faut aller à des distances de l'ordre de la taille de ces dimensions supplémentaires pour observer une modification. Précisons que la force gravitationnelle n'a été vérifiée que jusqu'à des distances de quelques centièmes de millimètre.

Il existe toutefois un cadre théorique dans lequel on pourrait observer des modifications à la loi de la gravité à des distances de l'ordre du millimètre. Ce sont les théories des branes. Selon ces théories, notre espace-temps à quatre dimensions serait une surface, une *membrane* (d'où le nom de brane) plongée dans un espace multidimensionnel. Matière et photons de lumière sont collés à cette brane et seuls les gravitons, qui sont les particules médiatrices de la force gravitationnelle, peuvent lui échapper : les dimensions supplémentaires sont alors testées uniquement par la gravité. Dans ces théories, nous-mêmes, la matière, nos accélérateurs, les galaxies que nous observons, la lumière qui nous permet de les observer, tout cela serait collé sur une surface à quatre dimensions, plongée dans un univers beaucoup plus grand. Dans ce cas très particulier, la force de gravitation pourrait être modifiée jusqu'à des distances de l'ordre du dixième de millimètre. Alors, en testant cette force de gravitation à des distances inférieures au dixième

ou au centième de millimètre, on pourrait directement observer des variations qu'on interpréterait comme dues à la présence de dimensions supplémentaires.

Cela donnerait une autre vision sur notre Univers et son évolution.

C'est sur quoi je travaille en ce moment. L'idée est que l'évolution de l'Univers, c'est-à-dire de l'espace-temps à quatre dimensions, est gouvernée principalement par la force de gravité. Si l'on modifie le nombre de dimensions, on modifie la force de gravité, on doit s'attendre à ce que l'évolution de l'Univers change. C'est un des enjeux de la cosmologie observationnelle que d'essayer d'identifier, dans les observations de plus en plus précises qui sont faites aujourd'hui, la signature non équivoque de prédictions de la physique microscopique telles que les dimensions supplémentaires. Avec la mesure des fluctuations du fond cosmologique, qui nous donne une image de l'Univers à des instants primordiaux, on espère trouver cette empreinte.

Pourquoi l'espace peut-il avoir neuf ou dix dimensions alors que le temps n'en a qu'une ?

Encore une grande question. On a plus de difficultés avec le temps qu'avec l'espace, principalement à cause de sa fameuse flèche. Quand on se pose la question des dimensions temporelles, on se heurte vite à un problème lié à la causalité, l'idée que l'effet pourrait précéder la cause. La flèche du temps traduit cette propriété de causalité. Essayons d'imaginer deux dimensions de temps. Avec deux dimensions d'espace, par exemple sur la surface d'une table, je peux dessiner un cercle. Qu'est-ce que cela donne pour deux dimensions de temps ? Pour une surface de temps ? La notion de flèche était associée à une ligne ouverte, pas à un cercle. En tournant dans les deux sens d'un « cercle du temps », je me retrouve avec une cause qui produit un effet mais aussi un effet qui produit une cause. Les physiciens n'ont pas vraiment trouvé de

solution à ce problème. Il faudrait imaginer des surfaces multidimensionnelles suffisamment compliquées pour pouvoir récupérer une sorte de causalité. Pour l'instant on se contente de multiplier le nombre de dimensions d'espace.

Ne serait-ce pas le fantasme de l'éternel retour ?

L'enfant qui se verrait naître une deuxième fois. Pour l'instant, le physicien s'interdit ce genre de spéculation. Il voudrait essayer de construire une théorie avec plus de dimensions de temps mais avec au moins un souvenir de flèche car c'est, pour l'instant, la seule façon d'être en accord avec ce que l'on observe dans le monde physique.

Un temps réversible ?

Cela serait pire qu'un temps réversible. On a déjà des temps réversibles dans la théorie d'Einstein quand un univers se contracte après une phase d'expansion. Dans un temps réversible, il y a toujours une flèche. Elle s'inverse simplement. Un temps à multiples dimensions dépasse ce qu'on peut imaginer... pour l'instant.

Le commun des mortels a déjà bien du mal à se représenter plus de trois dimensions d'espace et une dimension de temps, alors ce monde multidimensionnel ! Comment le physicien s'y prend-il ?

Pour être franc, le physicien n'y parvient pas non plus. Il a, lui aussi, des difficultés pour se représenter cela. Cette notion de boîte multidimensionnelle, c'est une façon d'essayer, avec des images simples, de se représenter des concepts complexes. Il serait intéressant d'étudier la façon dont les physiciens théoriciens tentent de visualiser schématiquement ces mondes multidimensionnels. Nous sommes peut-être prisonniers de nos représentations. Une des difficultés est d'éviter de se laisser

piéger par des images géométriques qui renvoient nécessairement aux trois dimensions d'espace familières. Pour cela, la formalisation mathématique est d'un grand secours.

Bibliographie

N. Arkani-Hamed et S. Dimopoulos, G. Dvali, « Les dimensions cachées de l'Univers » Pour la science, n 276, 2000, p. 56.

P. Binétruy, « La vie sur la brane », *Bulletin de l'Union des Professeurs de Spéciales*, n° 20, 2002, p. 14.

P. Binétruy (D. Wilgenbus, J.-M. Bouchard et P. Léna, Eds.), *La gravitation*, Graines de Sciences, Paris, Éditions Le Pommier, 2002, pp. 115-143.

B. Greene, *L'Univers élégant*, Paris, Robert Laffont, 2000.

LES DIMENSIONS DU VIVANT

Pierre Sonigo*

La génétique, et d'une façon plus générale la biologie, est un domaine extérieur à la physique, même si elle peut y plonger quelques racines. En l'occurrence, autour d'un thème comme « Le réel et ses dimensions », elle peut se sentir concernée. Avant tout, que peut bien signifier le concept de réel et de ses éventuelles dimensions dans le monde du vivant ?

En biologie, la question des dimensions n'a pas été soulevée comme en physique. Toutefois, on peut lier la question des dimensions à celle des échelles d'observation. Un nombre plus élevé de niveaux d'observation possibles distingue le vivant de la physique : molécule, cellule, individu, espèce, écosystème. Des questions différentes se posent selon l'échelle choisie pour observer, décrire et comprendre la vie.

* Directeur de Recherche INSERM, Génétique des Virus, département des maladies infectieuses. Institut Cochin, Paris.

En quoi la question des échelles d'observation est-elle différente pour la biologie ?

Le problème de l'observateur a été soulevé en physique. La biologie est, elle aussi, confrontée à cette difficulté. Les notions importantes qui structurent la biologie, comme celle d'individu ou celle d'environnement, sont fortement liées au point de vue de l'observateur et à ses choix. Par exemple, devant des cellules qui poussent dans un milieu de culture, vous pouvez adopter un point de vue extérieur, décider que ces cellules forment un tout. Un « individu » est défini par l'ensemble de ces cellules. Le milieu de culture est alors le milieu intérieur de cet individu. Vous pouvez aussi adopter un autre point de vue, par exemple celui des cellules. Cette fois, l'individu est la cellule isolée et non pas l'ensemble. Ce qui était milieu intérieur devient environnement. C'est donc le point de vue et non pas une caractéristique absolue qui définit ce qui est organisme individuel et ce qui est environnement.

Quel serait le meilleur point de vue ?

Cette question pose problème. Nous, humains, avons tendance à considérer que le bon point de vue, c'est le nôtre ! D'ailleurs, le véritable individu, celui qui compte, que nous appelons individu dans notre langage naturel, est notre personne, c'est-à-dire vous ou moi. Ce qui est à l'intérieur de nous est le milieu intérieur, et ce qui est à l'extérieur de nous est l'environnement. Cela nous semble une évidence. Or ce choix, que l'on pourrait qualifier d'anthropocentrique, est très structurant par rapport aux théories et aux descriptions du vivant que l'on pourra élaborer.

Ce statut particulier de l'individu est relativement récent dans l'histoire de l'humanité. Certaines civilisations n'ont pas toujours eu, dit-on, cette conscience de l'individu. Pour revenir à la biologie moderne, à quel niveau, autrement dit sur quel individu, doit-on porter le regard pour comprendre les processus de l'évolution ?

La théorie de l'évolution a besoin de définir une entité de référence, une « unité » de mesure du vivant. En effet, la sélection naturelle évalue la reproduction de cette entité. En biologie, tout se reproduit de manière enchevêtrée. Il en résulte que selon l'unité choisie, les résultats ne sont pas les mêmes, comme si les lois de la physique variaient selon que l'on effectue les mesures en mètres ou en pieds. Selon que l'on choisit les molécules, les cellules, les organismes, les espèces comme entités de référence, on obtient des théories différentes : les biologistes parlent de gène égoïste, darwinisme cellulaire, darwinisme classique, sélection de groupe, etc.

Pour illustrer cette question difficile, prenons l'exemple du cancer. On peut décider que l'entité à prendre en compte pour la sélection naturelle est la cellule. Comme les cellules cancéreuses se multiplient plus vite que les cellules normales, la sélection naturelle doit favoriser le cancer. Du point de vue de la cellule, le cancer est donc une bonne chose. Maintenant, si l'on prend comme entité de référence le corps humain dans son entier, le cancer est une mauvaise chose. En fonction du point de vue de l'observation, le cancer va être favorisé ou défavorisé par la sélection naturelle. Ainsi, la théorie de l'évolution prédit deux résultats opposés, en fonction d'un choix d'observation.

D'un point de vue strictement objectif, la question se pose de savoir quel est le meilleur point de vue : difficile de choisir, de l'individu ou du groupe, de l'altruisme ou de l'égoïsme. En l'occurrence, la cellule cancéreuse est égoïste.

Si l'on considère que ce qui compte est le corps dans son ensemble, les cellules ne sont que des parties de ce groupe. On attend alors des cellules qu'elles soient altruistes, d'une certaine manière, qu'au lieu de se reproduire pour elles-mêmes, elles se conforment aux intérêts du groupe auquel elles appartiennent. Au contraire, si ces cellules sont considérées comme des individus, elles développeront un comportement de reproduction égoïste, entre guillemets, c'est-à-dire du point de vue de la sélection naturelle.

Il semble qu'il existe des cellules qui programment leur propre suicide, pour permettre à l'organisme de survivre.

C'est un cas extrême d'altruisme cellulaire, qui va jusqu'au suicide pour le bien du développement de l'organisme. Ici, la biologie a fait des choix radicaux en terme de définition de l'individu. L'individu qui compte dans ce cas, c'est clairement le corps humain, ou un niveau équivalent chez les plantes et les animaux. Les cellules, en allant jusqu'au suicide, ne sont que les esclaves des intérêts de ce corps. Si l'on observe la mort d'une cellule, le suicide n'en est qu'une interprétation possible. Cette interprétation n'est pas anodine. Il n'y a que pour les cellules qu'elle est admise. Si l'on change d'échelle et si l'on considère les cellules comme des « animaux » à part entière, la vision change et le suicide n'apparaît pas comme une interprétation raisonnable. Dans la Nature, si l'on voit des animaux mourir, même si la cause de la mort reste mystérieuse, personne ne songe à interpréter cela comme un suicide. Pour les cellules, l'hypothèse est encore plus audacieuse : ce n'est pas un suicide de désespoir qui est proposé, mais un suicide altruiste nécessaire à la survie de la collectivité. Les animaux ne se suicident pas pour le bien de leur collectivité. Même chez l'homme, le bien collectif n'est pas une motivation fréquente de suicide. Malgré tout, pour des cellules, des animaux aussi dérisoires que cela, la biologie arrive à invoquer ce type d'explication. Ce n'est qu'une métaphore, bien sûr, mais une métaphore très forte, très structurante sur le plan théorique.

Cela fait apparaître un autre problème, que l'on pourrait qualifier de « conflit évolutif », dans la constitution et la survie d'un groupe. La question de l'individu et du groupe se repose alors du point de vue de ce type de conflit.

La Nature est un emboîtement de groupes et d'individus : un atome est un groupe de particules, une molécule un groupe d'atomes, une cellule un groupe de molécules, un organe un groupe de cellules, un individu un groupe d'organes. Question : peut-on définir ce qui est

individu et ce qui est groupe dans l'absolu ? Réponse : bien sûr que non, cela ne peut relever que d'un choix, d'une définition, avec tout le côté arbitraire d'une définition, d'une convention. À partir du moment où l'on fait un choix de ce type, on renonce au relativisme de l'observation. Ici, un choix peut être plus ou moins adapté à ce que l'on va étudier, mais il ne peut pas être un choix absolu. Au nom de quoi décider que le groupe qu'on a favorisé dans la théorie est le groupe de référence pour la biologie ? Cela semble quand même une étrange coïncidence, un peu troublante, que le bon groupe soit toujours le nôtre. L'individu à mesurer, c'est celui qui nous semble une évidence, c'est notre organisme. Autrement dit, à l'intérieur de notre corps, les cellules ne seraient que des pièces détachées, pas des êtres vivants à part entière. Elles n'obéiraient pas à leurs intérêts propres, mais à l'intérêt du corps dans son ensemble. Elles se « suicideraient », elles seraient altruistes. On va même jusqu'à se demander si à l'intérieur des cellules, la chimie ne serait pas différente de ce qu'elle est à l'extérieur. Autrement dit, y aurait-il aussi une sorte de chimie altruiste, de sacrifice de la chimie pour le bien-être de la cellule ? Une telle proposition est-elle vraiment acceptable ?

À partir d'une même observation de phénomènes de mort au niveau des cellules, est-il possible de proposer une interprétation qui ne fasse pas appel à une forme ou une autre d'altruisme cellulaire ?

La notion de « suicide altruiste des cellules » a été proposée parce que la mort cellulaire présente parfois des caractéristiques surprenantes. D'abord, lorsqu'on inhibe les réactions biochimiques cellulaires, les cellules ne meurent pas. Une cellule qu'on « endort » ne va pas mourir dans l'embryon, un peu comme si elle devait agir elle-même pour provoquer sa propre mort. C'est surtout la seconde observation qui allait dans le sens de l'hypothèse du suicide cellulaire et qui a imposé cette idée. Quand on inactive expérimentalement certains gènes, la cellule ne meurt pas. Cela a été observé notamment dans l'embryon d'un petit ver, un nématode dénommé *C. elegans*. En 2002, cette observation

extraordinaire a valu un Prix Nobel à Sydney Brenner, John Sulston et Robert Horwitz. En résumé, quand on inactive un gène, la cellule ne meurt pas. Dans le cadre classique du déterminisme génétique, où le gène produit les fonctions, on en déduit logiquement que la fonction du gène en question est de causer la mort cellulaire. Ce gène a été qualifié de gène « exécuteur ». Il représenterait un programme génétique de mort qui peut être mis en œuvre pour les besoins du développement embryonnaire. Bien qu'il fut assez difficile d'avalier cette histoire de suicide cellulaire, ces deux observations ont convaincu la communauté scientifique d'accepter cette étrange idée de programme de mort.

C'est certainement parce qu'il s'agissait de cellules, dont l'altruisme à l'égard du corps entier, si possible notre propre corps, est souvent invoqué, que l'on a admis une telle interprétation. À une autre échelle, on ne pourrait proposer une telle idée. Imaginons des renards, très voraces, qui dévorent des lapins. S'ils dévorent tous les lapins, ils vont finir par mourir de l'épuisement de leurs ressources. Imaginons maintenant que l'on enlève une dent aux renards. Ils seront un peu moins efficaces dans la consommation des lapins. Les lapins vont vivre plus longtemps et les renards, par là même, vivront aussi plus longtemps. Dans cet exemple, personne n'affirmera que la consommation des lapins correspond à un suicide ou à un programme de mort chez les renards. On ne dira pas non plus que la dent était l'organe de suicide des renards, au constat que lorsqu'on l'enlève, les renards vont vivre plus longtemps. L'interprétation proposée pour les cellules ne le serait certainement pas pour les renards. Pourtant, la survie est prolongée de la même façon si l'on enlève la dent du renard ou le gène de la cellule. Pour des phénomènes similaires, les interprétations diffèrent radicalement selon l'échelle à laquelle ils surviennent. De plus, le gène des cellules correspond presque à une dent. Le gène produit un enzyme qui consomme les protéines dont la cellule a besoin. De même que la dent croque les lapins qui nourrissent les renards, le gène croque les protéines qui nourrissent les cellules. Les observations sont très similaires. Pourquoi ne pas interpréter ce fameux suicide cellulaire comme on le ferait dans l'exemple des renards ? C'est la surconsommation des

ressources dont la cellule a besoin, et non pas un suicide programmé, qui aboutit à sa mort. Pourtant, ce n'est pas cette interprétation que l'on a choisi de retenir, on a préféré une forme d'altruisme extrême. Cela souligne qu'on a toujours un point de vue anthropocentrique sur la biologie et que les cellules ne peuvent être que les esclaves des intérêts de l'organisme dans son ensemble.

On retrouve une forme de contradiction dans l'exemple d'une population qui se développe, qui va épuiser son environnement et disparaître, alors que le darwinisme classique dit que ce sont ceux qui se développent le plus qui vont être sélectionnés.

En effet, mais qu'un développement trop rapide puisse aboutir ultérieurement à l'extinction de la population n'est pas en contradiction avec le darwinisme. La sélection naturelle n'agit que dans le présent, ici et maintenant. Elle ne prévoit pas l'avenir. La sélection ne peut permettre de renoncer à un avantage immédiat pour éviter une catastrophe à venir. Dans le cas de cellules comme dans le cas des renards, on peut tout à fait imaginer que la sélection naturelle, à force de favoriser la prédation et la capture des ressources, aboutit à une situation catastrophique. La reproduction rapide est sélectionnée tout de suite et la catastrophe ne survient que plus tard. La sélection naturelle ne peut pas anticiper la catastrophe et envoyer un message du genre : « Attention les cellules, il faut vous multiplier moins vite. C'est indispensable pour votre avenir et celui de votre collectivité ». C'est pour cela qu'il est difficile de concilier l'altruisme, voire le suicide cellulaire, avec le concept de sélection naturelle.

C'est là où les notions d'espace et de temps interviennent. Le vivant fonctionne, dans un environnement défini et pour une durée potentielle qui se développe sur une courbe temporelle en amont et en aval du moment présent. Une démarche qui considère un individu seul, autonome, coupé de son environnement spatio-temporel est erronée.

Le problème de l'individu ou du groupe peut être formulé en termes de connexions dans l'espace et le temps. Par définition, l'individu, est local et immédiat et le groupe est plus grand et arrive plus tard. Les dimensions spatio-temporelles sont plus étendues dans le groupe que dans l'individu. En génétique moderne, très inspirée de la cybernétique, le corps est un système commandé par un programme centralisé qui doit distribuer des informations. Si le groupe est gouverné par un intérêt commun, il faut que la voie à suivre pour préserver cet intérêt commun, qui n'est pas perceptible directement par les parties, leur soit indiquée d'une façon ou d'une autre. Distribuer à distance les informations issues d'un système central prend toujours un certain temps. En conséquence, les interactions de groupe sont plus lentes que les interactions locales qui sont plus immédiates. Tout se passe comme si, pour faire passer le groupe avant l'individu, il fallait faire passer le distant avant le proche, ou le futur avant le présent. Si la logique du groupe est invoquée pour expliquer les phénomènes observés au niveau des parties, cela revient à inverser la causalité, puisque le futur explique alors le présent. Le recours au corps dans son ensemble pour justifier l'explication biologique revient donc à une cause finale. Pour comprendre le corps sans recourir au finalisme, il faut commencer par l'oublier, c'est-à-dire adopter un autre point de vue. Pour se débarrasser une fois pour toutes du finalisme en biologie, il faut avant tout régler le problème de l'individu et du groupe.

L'intérêt de l'individu relève de la tactique immédiate alors que l'intérêt du groupe suppose une stratégie à moyen, voire à long terme. Comment envisager alors l'émergence de structures nouvelles. S'agit-il de l'exécution d'une programmation ou de tout autre chose ?

Tous ces problèmes sont liés. Comme on l'a vu, si l'on considère le corps humain comme un tout, il faut bien qu'il y ait quelque part une vision de ce tout. On est dans la métaphore du corps robot où un programme centralisé envoie des informations à chaque partie du corps. Au contraire, si on accorde l'autonomie individuelle à chaque partie,

par exemple à chaque molécule ou à chaque cellule, il faut rendre compte du phénomène de groupe autrement qu'en considérant le groupe en question comme une finalité. Le phénomène de groupe n'est plus préconçu et imposé à chacun des éléments. En fait, le groupe émerge du couplage des événements locaux. Il ne s'agit pas d'une volonté centrale qui diffuse à l'ensemble des individus et qui leur impose, les uns après les autres, l'intérêt du groupe. La simultanéité des phénomènes élémentaires, qui relèvent d'explications purement locales, génère le phénomène de groupe. C'est, non pas la diffusion d'une instruction à distance qui indique ce qui doit être fait en attendant que le résultat se produise, mais une simultanéité, un couplage de tous les avantages obtenus au niveau de chaque élément. L'image typique de cette émergence collective est la construction d'une ruche par les abeilles. Aucune d'entre elles n'a de plan d'ensemble, personne ne leur donne des instructions pour construire la ruche. Chacune obéit à des règles locales et le fait qu'elles le fassent ensemble permet l'émergence de la structure collective. C'est ce qui justifie le terme d'émergence : le phénomène collectif n'est pas écrit dans les interactions individuelles, il en émerge. On peut presque se demander si le phénomène collectif est une réalité dont il faut rendre compte, ou juste un autre point de vue sur cette réalité. La structure de la ruche, par exemple, ne peut pas servir de point de départ à l'explication. Il faut regarder chacune des abeilles déposer de la cire le plus loin possible les unes des autres. Cela génère une structure à base d'hexagones qu'on peut appeler « ruche » si on adopte un point de vue plus global. Toutefois, si on commence par penser à la ruche terminée, à adopter le point de vue global par anticipation, d'abord on ne comprendra pas le processus, et ensuite on sera tenté d'adopter un point de vue finaliste, qui dirait : « Il y a un plan, il y a un projet. ».

Le problème est le même au niveau du corps humain. Nous adoptons systématiquement le point de vue du « corps fini » car c'est celui que notre conscience produit spontanément. Du coup, pour expliquer comment le corps s'est construit, il nous est difficile de ne pas imaginer qu'il existe un plan qui en guide la réalisation. Cette vision de l'individu

comme point de référence, entre en résonance avec la vision de la génétique qui détiendrait le plan de cet individu. En renonçant à cet individu, on peut adopter un point de vue critique sur la génétique.

Le discours entendu actuellement, tout au moins du grand public, énonce que le code génétique est un plan très déterminant pour la construction de l'organe, de l'organisme en général et de l'individu. S'il faut regarder le corps autrement, comme l'émergence d'une singularité, que proposer à la place de l'exécution d'un plan ?

Si on regarde le vivant comme un phénomène global et non pas comme une succession d'individus, la question n'est pas celle de la reproduction mais celle de l'émergence de singularités dans le phénomène global. Comme pour la ruche, l'explication relève du phénomène général et ne peut être obtenue par un examen des individus pris isolément. L'idée de reproduction, qui est générée par notre façon de découper le réel, peut être abandonnée. L'exemple de la forêt va permettre de mieux comprendre ce point. Même s'il existe beaucoup de reproduction dans une forêt, on ne va pas dire d'une forêt qu'elle se reproduit. On dira qu'elle croît, qu'elle s'étend. Maintenant, dans cette même forêt, définissons comme individu de référence un carré de un mètre de côté. Ces carrés se ressemblent comme des frères. La croissance de la forêt peut alors être décrite en terme de reproduction des carrés. Le découpage que nous avons défini arbitrairement permet de parler de reproduction. Cependant, une fois qu'on a découpé la forêt en individus séparés, on se demande pourquoi ils se ressemblent. Voilà le paradoxe : on découpe les carrés et on est obligé de se demander pourquoi ils se ressemblent quand même. Si on ne découpe pas la forêt, la question de la ressemblance des carrés ne se pose pas puisque c'est une seule forêt. Pour résoudre la question de la ressemblance, il faut remplacer la connexion matérielle qu'on a rompue par une connexion virtuelle. Quelque chose doit passer d'un carré à l'autre, une sorte d'information structurante. En biologie, la génétique est chargée de connecter les individus. L'information structurante est génétique. Ce n'est pas facile de faire cette gymnastique.

N'y a-t-il pas des situations où le découpage en individus s'impose ?

C'est effectivement ce que l'on aurait tendance à penser. Lorsque le découpage est évident, on parle de reproduction, c'est souvent le cas en biologie. Quand il l'est moins, on parle de croissance ou de propagation, comme en physique. Toutefois, les physiciens se posent aussi des questions de découpage, par exemple dans le cas de la dualité onde-particule. Prenons un autre exemple, celui d'un extraterrestre qui regarderait les vagues sur l'océan. Il voit qu'elles se ressemblent, elles se succèdent et elles meurent sur la plage. Il pense : « Voilà quelque chose qui bouge, un rythme, une ressemblance, une vie, une mort. » Ce qu'il voit lui semble vivant. Puis il essaye, sur cet océan de vagues, de définir l'individu de référence, il n'y arrive pas. Il se demande s'il faut choisir la vague entière, les vaguelettes qui forment la vague, ou le groupe de huit vagues, parce qu'il a noté qu'il y avait une certaine périodicité par groupe de huit. Cela ressemble à la question de l'individu et du groupe en biologie. Admettons qu'il décide que c'est la vague de base qui forme l'individu, une fois qu'il a pris cette décision – déjà, on ne voit pas pourquoi prendre celle-ci plutôt qu'une autre – mais, s'il décide que les vagues sont séparées les unes des autres, il lui reste à expliquer pourquoi elles se ressemblent. Il a besoin d'un élément transversal. En découpant l'océan en individus, il rompt la continuité qui existe entre les vagues, et il devient indispensable d'inventer quelque chose pour expliquer qu'elles se ressemblent. En biologie, le problème est similaire. On est d'emblée convaincu de la séparation des individus et la génétique s'impose comme une évidence. Si l'on considère les vagues comme un continuum, elles se ressemblent parce qu'elles font partie de la même eau. Dans ce cas, si deux vagues se ressemblent, c'est parce qu'elles se partagent les eaux. Pas besoin d'un gène des vagues qui passe de l'une à l'autre. On peut aussi prendre l'exemple d'une branche qui pousse, on la casse en deux, les deux parties se ressemblent parce qu'elles sont issues de la même branche, d'un partage. On n'a pas besoin de faire passer une information génétique pour expliquer que les deux moitiés se ressemblent. Le problème est bien sûr d'aborder le vivant de la même manière, d'autant plus qu'une forte intuition, assez peu objective à vrai

dire, nous crie que nous n'avons rien à voir avec une misérable vague qui ne pense, ni ne parle... Mais qui sait ce que l'océan pense de nous ?

En va-t-il autrement pour ce qui est plus animé qu'une branche d'arbre, par exemple une cellule pendant la mitose ?

On peut porter le même regard sur la cellule, et voir la mitose cellulaire comme un phénomène de croissance suivi d'un partage. C'est plus difficile qu'avec la branche. Il faut repérer une symétrie qui apparaît pendant la croissance qui précède la division cellulaire. En effet, un objet doit être symétrique pour que son partage produise deux moitiés identiques. On peut couper la cellule selon cette symétrie pour en avoir deux. Évidemment, cela devient plus difficile pour expliquer des phénomènes comme la reproduction des mammifères. Pour ne pas avoir besoin de faire appel à la génétique, il faudrait voir la mère et l'enfant comme on voit la branche ou la cellule. C'est-à-dire voir la naissance d'un enfant non pas comme une reproduction de quelque chose d'indépendant qui s'est construit à côté, mais comme un phénomène de croissance de la mère, qui produit une symétrie selon laquelle s'opère le partage à la naissance.

L'enfant, considéré dans l'espace temps, finit par devenir, d'une certaine façon, « l'autre partie de la branche ».

Contrairement aux moitiés de la branche ou de la cellule qui se ressemblent tout de suite, l'enfant ressemblera à sa mère plus tard, de manière décalée dans le temps. Pour les organismes multicellulaires, la symétrie implique le temps, elle est plus difficile à définir que pour la cellule ou la branche. Mais il n'est pas nécessaire de faire appel à un programme génétique de construction pour expliquer que les moitiés d'une même chose se ressemblent.

Bibliographie

Gérard N. Amzallag, *L'homme végétal*, Paris, Albin Michel, 2003.

Jean-Claude Ameisen, *La sculpture du vivant*, Paris, Éditions du Seuil, collection « Points sciences », 2003.

André Pichot, *Histoire de la notion de gène*, Paris, Éditions Flammarion, collection « Champs Flammarion », 1999.

Scott Camazine, Nigel R. Franks, Jean-Louis Deneubourg, *Self-Organization in Biological Systems*, Princeton University Press, 2001.

Leo W. Buss, *The Evolution of Individuality*, Princeton University Press, 1987.

Du même auteur

Avec J.-J. Kupiec, *Ni dieu ni gène, pour une autre théorie de l'hérédité*, Paris, Éditions du Seuil, collection « Points sciences », 2003.

Avec Isabelle Stengers, *L'évolution*, Les Ulis, EDP sciences, collection « Mot à Mot », 2003.

LE RÉEL ET SES REPRÉSENTATIONS

Yves Pomeau*

Il n'est pas interdit à un physicien de s'intéresser aux arts plastiques, d'aimer la peinture et de présenter quelque compétence en ce domaine. Il est moins fréquent qu'il vienne à l'esprit du dit physicien qu'il pourrait y avoir une certaine corrélation entre les représentations du monde des scientifiques et celles des peintres de la même époque.

Il s'agit évidemment d'un sentiment personnel, et pour illustrer cette hypothèse, je partirai de la Renaissance italienne. Je choisirai l'exemple de Giotto, certes pré-renaissant, mais que l'on peut considérer comme le premier peintre de la Renaissance. Je vais tenter de mettre en parallèle son travail dans ses peintures, ses fresques surtout, avec la « Renaissance galiléenne » en physique. Giotto arrive après la peinture d'inspiration byzantine, une peinture statique, ce qui ne veut d'ailleurs pas dire une peinture de mauvaise qualité. C'est au contraire une peinture très forte et très profonde, mais elle représente en général des gens, des saints, des rois dans des positions statiques indépendamment de

* Directeur de Recherche au CNRS, Laboratoire de Physique Statistique, École Normale Supérieure, Paris.

l'espace environnant. Giotto, notamment dans les fresques d'Assise, fut le premier à montrer des personnages en mouvement. À Assise, une fresque très célèbre qui, hélas, a été endommagée par le dernier tremblement de terre et assez bien restaurée par les Italiens, montre saint François – thème central des fresques d'Assise – donnant son manteau à un pauvre. Le mouvement de saint François, l'indication du geste, la torsion du corps sont représentés d'une façon si convaincante, qu'on peut avoir l'impression qu'il bouge. D'autant que ce mouvement s'insère dans un espace également bien défini par deux collines à l'arrière-plan. Ce sont des collines pierreuses, surmontées chacune d'un monument. Cette façon de représenter l'espace et l'homme qui y est inséré est une nouveauté dans la peinture européenne.

On pourrait dire sensiblement la même chose d'un autre peintre qui, lui, vit en pleine Renaissance : Léonard de Vinci.

En effet Léonard de Vinci illustrerait peut-être encore mieux mon propos, d'autant qu'il avait aussi une activité, peut-être pas vraiment scientifique mais technique. Il a inventé tant de choses. Il est allé jusqu'à imaginer une machine volante proche de nos hélicoptères. Il a laissé beaucoup de dessins, croquis, schémas, témoignant de son génie inventif. J'aurais pourtant une petite réserve sur ce que je connais des peintures de Léonard. Il n'y a pas toujours cette profondeur que l'on voit chez Giotto. Par exemple, le tableau le plus connu de Vinci, et de très loin bien sûr, est la Joconde. Elle apparaît détachée d'un fond tout à fait statique, on ne la sent pas insérée dans une représentation picturale de la profondeur, dans un espace réel. Giotto fut un grand précurseur de ce point de vue. Il a représenté l'homme dans l'univers tel qu'il est, d'une façon plus convaincante que Léonard. Pour Giotto, la représentation de la figure humaine, du corps humain jouait un rôle moindre que pour les peintres renaissant comme Léonard et un peu plus tard comme Le Titien, par exemple. La contribution majeure de Giotto, sur laquelle nous vivons encore en un certain sens, est cette représentation où l'homme n'est plus absolument au centre de l'espace pictural.

Dans quelle mesure une corrélation peut-elle être établie entre cette forme de peinture et les travaux de Galilée ?

Quel rapport peut-on faire établir entre la position nouvelle de l'homme dans l'espace pictural et la relativité galiléenne ? Évidemment, on peut prétendre qu'il ne s'agit que d'une figure de style, en quelque sorte. Ce rapprochement n'est peut-être pas très pertinent, mais c'est une idée qui m'est venue. Il me semble que la vision scientifique de la Renaissance italienne présente un parallèle avec les représentations de la Renaissance picturale. Galilée est le premier grand scientifique de la Renaissance, certes postérieur à Giotto, ce grand précurseur. Souvent, l'artiste visionnaire, intuitif, précède de loin la compréhension de la science.

Galilée est le premier à s'être détaché de la science scolastique où le seul interlocuteur de l'homme était la divinité. Il s'en est détaché pour commencer à réfléchir sur le monde tel qu'il est, non pas un monde géométrique, celui des Anciens, mais un monde dynamique, que l'on pouvait observer et sur lequel on pouvait faire des prédictions vérifiables. Là aussi, c'est de la place de l'homme par rapport au monde qui l'entoure et la façon dont il se le représente, qui devient la question importante. En deux mots, la contribution de Galilée a été de jeter les bases des lois du mouvement. Avant lui, il y avait eu des tentatives scolastiques pendant tout le Moyen Âge, dont certaines remontaient d'ailleurs à l'époque hellénistique. Mais, on n'arrivait pas à comprendre les lois du mouvement, avec les modèles préétablis qu'on utilisait, dus plus ou moins à Aristote. Galilée s'est aperçu que le monde ne se conformait pas nécessairement aux affirmations d'Aristote, qu'il fallait observer et mesurer, pour établir les lois qui régissaient le monde.

Ainsi, la corrélation apparaît dans la comparaison de la représentation du réel chez Giotto et de l'investigation du réel chez Galilée.

C'est, en effet, une bonne façon de résumer ce que je pense. La dimension du réel commence à envahir le monde scientifique et le monde artistique.

On parle de la relativité galiléenne. Peut-on parler de relativité à propos de la peinture de Giotto ?

Ce n'est pas certain. La relativité galiléenne est une formulation moderne. Ce mot n'entrait pas dans le vocabulaire de Galilée, seulement l'idée, comme chez Newton. Toutefois, il me semble qu'on ne peut pas faire de parallèle trop précis, de ce point de vue, entre la vision de Giotto et les conceptions de Galilée. Il n'en reste pas moins que la contribution de Giotto a été de proposer une représentation du mouvement, une mise en évidence des gestes des personnages, beaucoup moins statique que dans la peinture byzantine dont il s'est en partie inspiré. Alors, peut-être que cette représentation du mouvement pourrait être mise en regard de la relativité galiléenne. La relativité galiléenne concerne les lois de la physique qui sont invariantes, elles sont valables dans un repère mobile et dans un repère fixe. C'est une notion abstraite que, vraisemblablement, 80 pour cent de nos contemporains ont du mal à concevoir. On ne peut pas dire que Giotto en ait eu la prémonition. Ce serait exagéré.

Cherchons maintenant un autre exemple, en avançant dans le temps, vers ce que l'on appelle habituellement « l'âge classique », les ^{XV}^e et ^{XVIII}^e siècles.

Prenons, comme œuvre picturale à mettre en relation avec une œuvre scientifique majeure un tableau de Vélasquez, *La Reddition de Breda*, qui se trouve au musée du Prado, avec l'œuvre scientifique majeure de l'Age classique que sont les *Principia* d'Isaac Newton.

La Reddition de Breda représente un des épisodes des guerres que se sont livrées les Espagnols et ce que l'on appelait à l'époque les Provinces Unies (maintenant les Pays-Bas, en gros). C'est un tableau extraordinaire. Sans être un spécialiste de l'art, j'y vois une sorte de profondeur picturale et une qualité de représentation de l'espace

exceptionnelle. Deux personnages au premier plan se font une sorte de révérence, derrière eux on voit une rangée de soldats de part et d'autre. Le plus extraordinaire se trouve sur la partie droite du tableau où il y a une rangée de lances tenues par les vainqueurs (j'imagine), et ces lances structurent étonnamment l'espace. Elles donnent une sensation de profondeur, et mettent en évidence les différents plans. Elles indiquent en même temps une direction. Ce tableau, me semble-t-il, est très important parce que, dans la continuité de Giotto, il place l'homme dans le paysage, l'homme est au milieu du paysage, au milieu d'un espace bien structuré, bien défini. Ce grand peintre de l'Âge classique a suscité des considérations voisines des miennes, (impressions évidemment toutes personnelles) à travers l'époustouflante discussion des *Menines* au début de *Les Mots et les Choses* de Michel Foucault. Je ne vais, bien sûr, pas en parler ici, après Foucault cela serait difficile. Mais encore une fois *La Reddition de Breda* est tout à fait exceptionnelle car, en même temps que la qualité picturale équilibre les formes, l'homme y apparaît comme un élément du paysage. Il n'est plus au centre de la représentation.

Donc la position des personnages relativement au décor diffère de celle des tableaux de la Renaissance..

En effet, dans ce tableau exceptionnel, les personnages ne sont plus que des éléments de la composition. Quand on regarde le tableau, l'œil n'est pas tout de suite attiré par ce que font les personnages, ce qu'ils sont censés penser : ils appartiennent au décor. Il est très difficile d'exprimer cela avec des mots. Dans les tableaux du Titien, ce n'est pas du tout comme cela (du moins ceux que j'ai pu voir), on ne voit que le personnage. Avec Velasquez, il s'agit bien d'une modification qui va d'ailleurs se poursuivre dans la peinture européenne. On pourrait peut-être en dire autant, de *La Ronde de Nuit* de Rembrandt où les personnages ne sont pas au centre de la représentation, mais seulement un élément du monde tel qu'on le voit.

En quoi les travaux de Newton correspondent-ils à cette nouvelle vision de la position de l'homme dans le monde ?

Dans les Principia, la position de Newton est claire, surtout dans la première préface où il justifie l'exercice de la raison. Selon lui, l'homme peut atteindre à des vérités qui ne concerneraient pas que la géométrie, la position des Grecs, mais « il peut comprendre le monde tel qu'il est par l'exercice de la raison ». C'est à la fois relativiser la place de l'homme et le placer dans une position prééminente mais, à une condition, par l'exercice de la raison. Donc, caractéristique unique, il va pouvoir comprendre le monde tel qu'il est. Ce qui ne veut pas dire, en tout cas pour Newton, qu'il s'agit d'une science qui élimine le divin. Newton était un croyant. Toutefois, pour lui, l'exercice de la raison, le raisonnement permettait de comprendre, de déceler ce qui est derrière l'évidence. Bien sûr, c'est une pétition de principe, qui en soit n'a pas valeur heuristique. C'est intéressant, mais sans plus. Ce qui est extraordinaire, en revanche, c'est qu'à partir de cette pétition de principe Newton lui-même a réussi à déchiffrer des mystères extrêmement profonds de la nature. On peut voir les choses ainsi : l'idée de Newton était qu'il y a une sorte d'altérité à l'homme, qui est le monde environnant et que point n'est besoin de faire appel à une autre altérité transcendante pour le comprendre. L'homme est dans le monde, comme le monde.

L'homme est un élément du monde, sans plus.

Je ne suis pas sûr que ce soit l'idée de Newton. La question de la relation au divin est une question différente. Il semble que sa pensée reflète plutôt que la relation au divin n'est pas contenue dans la relation de l'homme au monde tel qu'il est. C'est sans doute une idée qui mérite réflexion, mais ce n'est pas certainement pas l'idée d'un agnostique.

Après Galilée et Newton, la troisième étape, qui s'impose, c'est Einstein. Quel est l'événement pictural qui pourrait être corrélatif de la vision einsteinienne du monde ?

Albert Einstein a commencé ses travaux au début du ^{xx}e siècle. Il a donc été contemporain des grands peintres de cette époque tels que Paul Cézanne ou Claude Monet. Je ne sais pas s'il les appréciait ni même s'il les connaissait. En revanche, il est évident que si l'on se pose la question d'une liaison quelconque entre la science et la représentation du monde par les peintres, on pense tout de suite aux grands peintres de la fin du ^{xix}e siècle et du début du ^{xx}e : Cézanne, Monet, Paul Gauguin, Vincent Van Gogh, pour ne citer qu'eux. Alors, pour suivre le fil de mon idée, je propose de m'intéresser à une peinture de Cézanne, *Vue de L'Estaque*. L'Estaque est au nord de Marseille, au bord de la mer. Cette « vue » représente toute la baie de Marseille vers le Sud : au loin la chaîne de Marseillevyre, au premier plan, une cheminée d'usine rouge. C'est un tableau dans lequel la profondeur est traitée d'une façon très fine, très subtile. Le paysage reflète une sorte d'impression, qui s'exprime dans une gradation du premier plan vers les lointains, assez fascinante. Par exemple, la cheminée d'usine, un peu comme les lances de *La Reddition de Breda*, structure l'espace par une verticale et donc, se trouve plus proche du centre du tableau que du côté. Il y a, par ailleurs, une utilisation très fine de la couleur, avec des bleutés dans le lointain, les montagnes remontent vers la gauche et la mer, la grande bleue, s'étale devant. Avant d'essayer de tracer un parallèle avec Einstein et la révolution de la physique du début du ^{xx}e siècle, il faut signaler que ce tableau est un peu antérieur aux représentations de la Montagne Sainte-Victoire qui ont occupé la fin de la vie de Cézanne. C'est une toile remarquable.

Ce qui est frappant dans ce tableau de Cézanne est l'absence de personnage. L'homme a disparu, il y a le monde tel qu'il est, avec toute cette richesse de formes et de couleurs, cette utilisation très fine des contrastes entre le premier plan, le moyen plan et l'arrière-plan dans ce monde où l'homme a disparu, en quelque sorte, dans la présence physique du paysage. J'y vois une relation avec la révolution physique de la fin du ^{xix}e siècle, début du ^{xx}e, due en grande partie à Einstein, et à d'autres tels que Max Planck, Werner Heisenberg, Louis de Broglie etc. À ce moment-là, la physique est arrivée, au moins à notre échelle à une compréhension complète du monde physique. L'électromagnétisme de

James Maxwell nous expliquait comment se propage la lumière. L'émission et l'absorption de la lumière, qui détermine la couleur des objets et qui a joué un rôle relativement important dans les débuts de l'impressionnisme, ont été expliquées par Planck et Einstein. La consistance des matériaux a été expliquée par la physique atomique et moléculaire, etc. Ce début du ^{xx}e siècle a vu se refermer le chapitre de la physique concernant l'explication du monde sensible tel qu'il se manifeste à l'échelle humaine. Peut-être reste-t-il des problèmes concernant la structure de l'Univers à grande échelle, mais une grande partie des questions sont résolues au moins pour ce qui concerne les aspects fondamentaux qui influent sur le monde à notre échelle.

Alors, dira-t-on, pourquoi serait-ce à mettre en relation avec une certaine disparition de l'homme ? Ce n'est évidemment pas la négation de l'existence de l'homme. Il s'agit de sa disparition en tant qu'être physique. L'être physique de l'homme n'est pas, d'un certain point de vue, différent des objets matériels qui nous entourent (une idée fort ancienne, bien sûr, qui remonte au moins à Diderot, mais il restait à le prouver !). Cette singularité de l'être physique perçue comme « dans le monde », concomitante de cette espèce de découverte ultime de la physique significative à notre échelle, et de la disparition de l'homme dans certains tableaux de Cézanne et des certains de ces contemporains. Certes, Cézanne a laissé de très grands portraits, mais, bizarrement, il y a toujours dans ces portraits quelque chose, je ne saurais dire pourquoi, de cette disparition de l'homme. Sensiblement, ce sont en fait des grands morceaux de peinture, des formes et des couleurs. On n'y sent guère de psychologie (sauf sans doute pour les merveilleux autoportraits). La psychologie de la personne représentée n'apparaît pas, c'est une démarche qui ne tente pas de représenter l'homme en tant qu'être singulier.

Les impressionnistes sont contemporains de Cézanne. En tant que physicien, que vous inspirent les impressionnistes ? Ces petites touches, ces façons de vibrations qui dessinent finalement personnages et paysages ont-elles quelque chose à voir avec les représentations de la physique contemporaine ?

On dit que les impressionnistes (Jean Renoir et Camille Pissarro, je crois) étaient motivés, inspirés, par les travaux de Eugène Chevreul sur la décomposition de la lumière en différentes couleurs. Que la lumière blanche se décompose en couleurs est d'ailleurs une idée qui remonte à Newton. Cependant, il me semble que l'impressionnisme est moins relié à une conception globale du monde que l'œuvre de Cézanne. Par exemple Monet, Pissarro ou Alfred Sisley, qui sont des peintres d'une dextérité prodigieuse, d'une grande virtuosité, étaient moins en relation avec le mouvement des idées de leur temps que ne l'était Cézanne. Je connais assez bien l'historiographie de Monet, il se fichait complètement des théories sur la peinture et sur le monde en général. Selon la fameuse expression de Cézanne : « ce n'est qu'un œil, mais quel œil ! ». Je crois que c'est assez juste. Monet est un grand virtuose. Ce qu'il fait est évidemment d'une beauté prodigieuse, mais dans les sujets et dans la représentation de l'espace, il reste relativement traditionnel. Cela ne paraît pas être aussi novateur que l'œuvre de Cézanne.

Et la peinture abstraite ?

La démarche des abstraits, d'une certaine manière, reprend l'idée de la disparition de l'homme, avec tout ce que cela implique : la disparition de la représentation physique du monde. Citons tout de même l'exemple de Nicolas de Staël, un peintre que j'aime beaucoup, dont on a parlé récemment lors l'exposition au Centre Pompidou, qui est allé de l'abstraction pure à une sorte de représentation du monde, inspirée de son expérience abstraite.

A priori, on peut dire que l'abstraction, c'est la disparition du monde, de l'espace tel qu'il est. On pourrait mettre cela en relation avec les progrès de la science actuelle qui ne voit plus le monde dans sa représentation phénoménologique, mais où l'on représente tous les objets par des atomes, des ondes électromagnétiques, quantiques, etc. Ces ondes et ces particules deviennent les objets premiers de notre représentation actuelle de l'Univers. Ces objets sont en un certain sens

complètement abstrait, il n'y a plus que des équations de Schrödinger, de Maxwell, etc. Donc, pour notre compréhension du monde, la phénoménologie est en quelque sorte une donnée seconde par rapport à cette représentation complète que la science donne de l'Univers. C'est en cela différent de Galilée et de Newton. Les objets de la théorie de Newton étaient des objets du monde sensible, du monde phénoménologique, alors que maintenant les objets de l'investigation scientifique sont purement abstraits. Ce qu'on calcule, ce qu'on simule avec des ordinateurs, n'a qu'un rapport lointain avec le monde sensible qui nous entoure. Cette disparition du monde phénoménologique est à mettre en relation avec l'abstraction de la physique contemporaine. De ce point de vue, on pourrait mettre en relation des peintres tels que Paul Klee ou Piet Mondrian, tous deux Hollandais, avec cette disparition du monde sensible qui s'opère par une substitution d'espaces colorés, purement imaginaires mais qui pourraient évoquer des mondes, atomique, subatomique, quantique, auquel le scientifique est confronté. Il n'est pas inintéressant de noter que, même dans cette approche, le scientifique a besoin, pour raisonner, de se représenter les objets sur lesquels il travaille. Pour ce qui me concerne, une inspiration me vient de cette représentation abstraite par les peintres. Pour comprendre ces choses on est souvent amené à une sorte de représentation mentale, qui ne se base pas seulement sur des équations, aussi sur une représentation géométrique qui peut se retrouver dans des œuvres comme celles de Klee ou Mondrian.

Certaines représentations en physique sont géométriques. N'empruntent-elles pas aussi à Benoît Mandelbrot, notamment sur l'utilisation des fractales ?

Les fractales sont un très bon exemple, un exemple en or, où l'art et la science se rencontrent. Une des raisons du succès des fractales, c'est qu'elles se prêtent très bien à des images, en même temps qu'elles donnent une représentation de certaines propriétés mathématiques d'objets du monde qui nous entoure. Avant Mandelbrot, d'autres ont

promu une géométrie non-euclidienne, non-lisse, mais cette géométrie des fractales a l'avantage de jouer un rôle important, non pas dans la représentation d'objets géométriques tels qu'on les voit dans notre Univers, mais dans la représentation d'objets abstraits qui nous servent à décrire cet univers.

Il y a un glissement continu de la notion de réel, d'un réel qu'on voit, à un réel que l'on conçoit. Cette conception nous conduit à considérer des choses de plus en plus abstraites, à mesure des progrès. Le lien, avec la perception phénoménologie du monde environnant, est de plus en plus distendu, de plus en plus lointain. Toutes ces avancées n'apportent pas encore de réponse à une interrogation fondamentale comme : « Qu'est-ce que le réel ? »

Ce n'est pas aujourd'hui que l'on va y répondre !

UN VRAI-FAUX LAPIN DANS UN CHAMP DE CAROTTES

Philippe Coiffet*

La robotique et la réalité virtuelle sont à la fois du domaine de la science et de la technique. À travers elles se pose la question de savoir ce qui relève du réel et ce qui n'en relève pas, car elles sont étroitement liées à l'imitation du vivant, et, en cela, aux sciences de la vie, notamment aux neurosciences.

À lire le titre, on est d'abord intrigué, puis le rapprochement du « vrai-faux » se fait avec « réalité virtuelle », comme d'ailleurs « intelligence artificielle », formulation tout aussi intrigante ; on se demande s'il ne s'agit pas d'oxymorons. Puis, la question vient : que conçoit le roboticien quand il parle de réalité ?

Dans les deux spécialités que je représente ici, robotique et techniques de réalité virtuelle, on n'envisage pas le réel dans son sens le plus global que les philosophes étudient depuis 2 500 ans. En effet, ce concept pose les questions fondamentales de la vocation de l'homme, du sens de sa vie et de sa destinée *post-mortem*, questions sur lesquelles

* Directeur de Recherche au CNRS. Membre de l'Académie des Technologies. Laboratoire de Robotique de Versailles. CNRS-Université de Versailles Saint Quentin.

on n'a toujours pas de réponses crédibles d'un point de vue scientifique. Pour nous, il s'agit plutôt d'observer comment ces deux disciplines entrevoient la problématique de ce qui est réel ou de ce qui ne l'est pas, c'est-à-dire de ce qui est virtuel ou relève du fantasme...

Quelles sont alors les caractéristiques du domaine ? Quels sont les rapports de la robotique avec la réalité virtuelle ? C'est un champ de recherches récent relativement aux autres domaines de la science, et toujours très évolutif.

Le but des recherches contemporaines de la robotique peut s'exposer simplement. Il s'agit de créer des systèmes qui agissent sur leur environnement en manifestant un comportement qu'on peut qualifier d'intelligent, c'est-à-dire un comportement rappelant celui de l'homme dans l'élaboration de stratégies d'actions permettant d'atteindre un résultat, une modification souhaitée de l'environnement.

La robotique a environ soixante ans. On peut dire qu'elle a commencé après la seconde guerre mondiale comme un enfant de la discipline « automatique » qui traite des problèmes de commande et de contrôle des systèmes. Elle est passée par plusieurs étapes. La première a été celle de la robotique industrielle qui a donné pignon sur rue au domaine de recherche. Aujourd'hui, on peut dire que la robotique industrielle appartient quasiment au passé. En effet, ces robots fonctionnent comme des automates et cela est possible parce qu'on connaît à l'avance tout ce qu'un robot doit faire, ainsi que l'environnement dans lequel il doit le faire. Cela est parfaitement maîtrisé et a montré son efficacité dans le domaine industriel.

Aujourd'hui, on veut concevoir des robots qu'on nomme « robots de service » dont la caractéristique majeure est d'être mobiles. Toutefois, qui dit mobile dit prise de conscience d'un environnement instantané et changeant difficilement prévisible et capacité de déduction de ce qu'il y a lieu de faire à chaque instant pour atteindre un objectif fixé à l'avance.

Les problèmes à résoudre sont donc très complexes aussi bien sur le choix des modes de locomotion que sur celui des modes de perception, et sur l'intelligence permettant de comprendre les situations et d'en déduire le bon comportement pour réussir les actions finales désirées.

Cela correspond à de l'apprentissage. Donc les nouvelles générations de robots sont capables d'apprendre et d'adapter leur comportement aux modifications du milieu.

Les formes d'apprentissage sont nombreuses. On peut apprendre à l'avance quelque chose qu'on récite par cœur, comme un perroquet. C'est le cas des robots industriels et cela peut donner satisfaction. Aujourd'hui, le défi est plutôt d'apprendre à apprendre, ce qui permet de comparer des situations et de ne retenir que ce qui peut être utile dans des contextes différents. N'oublions pas que les robots de service doivent élaborer sur place des stratégies qui n'ont pas été préparées à l'avance. C'est en cela que l'on se rapproche des modes utilisés par l'intelligence humaine et c'est à cela que l'on veut parvenir. Sur cette route, on a déjà enregistré quelques succès mais aussi pas mal d'échecs. Sur le papier ou sur l'ordinateur on peut croire atteindre le but, mais quand on expérimente, il faut souvent admettre que c'est beaucoup plus compliqué qu'on ne le croyait.

C'est ce qui fait parler de la « médiocrité des robots » : ils sont limités dans leur capacité de se perfectionner, de s'adapter.

C'est en effet le cas, mais il faut regarder les robots en fonction de ce qu'on en attend. Si on se place du point de vue des robots dans des applications industrielles, on est proche de la perfection. Sans doute peut-on encore améliorer les performances, mais ce seront des améliorations de détails : plus grande vitesse, plus grande précision, meilleure sûreté, etc. Maintenant, si on regarde l'objectif final qui serait – on ose à peine le dire car ce point est très controversé et demande beaucoup de

bémols et d'explications qu'on ne peut donner ici – une sorte de capacité d'homme artificiel, on peut dire qu'on est sur la bonne voie. Tous ceux qui font de la recherche avancée en robotique s'orientent vers la réalisation d'humanoïdes ou d'animaloïdes. Il s'agit d'imitations des êtres vivants dont on veut qu'elles aient des comportements qui ressemblent à l'humain ou au vivant. Quand on parle ici de comportement, il s'agit d'un comportement physique généré par le comportement mental, ne l'oublions pas.

De là à parler d'intelligence artificielle, il n'y a pratiquement aucun pas à franchir.

Il n'y en a pas. L'intelligence artificielle s'exprime par une technologie qu'on introduit directement dans l'ordinateur qui sert de cerveau au robot. D'ailleurs, il faut le signaler aux plus jeunes – les anciens en sont bien conscients pour avoir essuyé les plâtres – que quand on fait de l'intelligence artificielle déconnectée d'une application physique, bien souvent on s'égare en robotique. Ce genre d'erreur a été commise au début de l'intelligence artificielle où les gens disaient : « On ne fait cela que sur un ordinateur ; c'est un programme. » Seulement voilà : aucun programme généré avec cette philosophie n'a pu être appliqué de façon satisfaisante à des machines qui devaient transformer leur environnement. C'était satisfaisant pour des applications purement mentales comme de la classification ou des choses similaires. Aujourd'hui, ceux qui fabriquent de l'intelligence artificielle incluent dans leurs conceptions d'algorithmes les modèles et caractéristiques de la machine qui recevra l'implantation du logiciel.

Ce que l'on nomme réalité virtuelle englobe donc à la fois la création d'un environnement et la capacité d'y évoluer.

Oui, la réalité virtuelle a émergé indépendamment de la robotique, même si la robotique est un champ d'applications privilégié de la réalité

virtuelle. Cette dernière est essentiellement issue des progrès de l'informatique en infographie et des simulateurs de vol très perfectionnés, réalisés d'abord par les américains pour entraîner les pilotes d'avions. Cela consiste effectivement à recréer des environnements artificiels face auxquels ou dans lesquels on place l'homme. Ce dernier a l'impression d'être présent dans ce nouvel environnement alors qu'il est assis sur un siège dans l'environnement physique d'une salle. Cette faculté d'immersion et de conviction que l'homme a d'être ailleurs que là où il est vraiment est le théorème de base du succès des techniques de réalité virtuelle. La réalité virtuelle ne s'utilise pas qu'en robotique mais elle sert énormément lorsqu'on la considère comme un système de commande pour des machines distantes. C'est un lien important entre la réalité virtuelle et la robotique.

Le pilote apprend à piloter dans un bureau avec un écran devant lui et un siège qui bouge. Cette technologie simule le monde réel, elle peut donc être déployée dans d'autres applications.

Les techniques de réalité virtuelle sont des simulations interactives d'avant-garde. Elles peuvent avoir de nombreux usages et de une à un grand nombre de personnes interagissent avec la scène virtuelle et entre elles. Elles sont par exemple utilisées dans l'enseignement. Il existe des cadavres virtuels pour étudier l'anatomie sous toutes leurs coutures et ce genre de logiciel est distribué commercialement. On les utilise aussi dans ce qu'on appelle *concurrent engineering* ou travail partagé. Vous êtes dans votre bureau en France, votre collègue est dans un bureau en Allemagne et vous travaillez ensemble de façon instantanée comme si vous étiez dans le même bureau, pour concevoir un nouveau moteur, une nouvelle pièce, une maison, etc. Cela se pratique déjà dans les entreprises internationales. La seule application aujourd'hui économiquement rentable est bien sûr l'application ludique, les jeux où l'opérateur humain est dans un environnement extraordinaire, qu'il soit militaire, fantastique ou autre. Il existe un très grand nombre de jeux avec des avatars spectaculaires.

Pour revenir à robotique, en dehors de l'utilisation de la réalité virtuelle pour la conception de robots comme de tout autre machine, l'application essentielle reste celle où l'homme est immergé dans un monde virtuel pour commander et contrôler une machine située n'importe où dans le monde réel. L'opérateur a l'impression d'être auprès ou dans la machine, ce qui facilite sa commande. Dans ce domaine qui peut s'appeler télétravail, les applications ne sont pas encore bien maîtrisées. De nombreuses expériences ont été faites. J'en ai fait moi-même avec mon équipe, dès 1997, entre la France et le Japon pour commander plusieurs robots d'assemblage. On en fait aussi évidemment aux États-Unis.

Si l'embryon actuel se développe, s'il réussit à s'imposer, cela peut avoir des conséquences socio-économiques considérables. On est à l'usine chez soi et on y travaille physiquement. Exemple de conséquence : si à Paris tout le monde reste chez soi pour travailler, plus d'embouteillages le matin, ni le soir. Toutefois, d'autres problèmes surgiront dans la vie sociale. Si le succès était au bout des recherches, les conséquences pratiques d'une implantation généralisée de systèmes de télétravail sont gigantesques. À l'Académie des Technologies, nous travaillons sur ces sujets ; notre vocation est un peu de prévenir les autorités sur les derniers développements technologiques et surtout sur leurs conséquences sociologiques et économiques prévisibles.

C'est ce qu'on appelle la « veille technologique ».

Notamment, mais on essaie de faire des études qui vont au-delà de la veille technologique. Je m'occupe en ce moment d'un groupe de travail sur l'interaction homme-machine. Aujourd'hui, une nouvelle caractéristique, qui n'existait pas il y a encore peu de temps, s'impose. À partir du moment où un homme est aux commandes d'une machine, on doit concevoir la machine en tenant compte de cet homme car il devient un composant du système de la machine. On ne conçoit plus une simple machine à laver le linge sans penser que quelqu'un va appuyer sur des boutons. Plus qu'une notion d'ergonomie, on

introduit une notion de convivialité, la machine devenant un véritable partenaire de l'homme. Voilà qui change en profondeur les techniques de conception. On commence par s'interroger sur ce que souhaite l'homme et l'on construit la machine en fonction de ce souhait et des caractéristiques de l'utilisateur. Auparavant, on disait : « Je veux faire une machine qui mette des bonbons dans des sachets au rythme de 100 paquets par minute. ». On ne s'occupait pas de qui allait conduire la machine et la surveiller. On concevait une machine entièrement automatique ; on supposait qu'il suffisait d'appuyer sur un bouton et que tout allait bien se passer. Toutefois, ce type de machine demande une forte maintenance et donc une forte interaction homme-machine durant ces phases de maintenance. Aujourd'hui, à cause de l'envahissement des machines dans tous les moments privés et professionnels de la vie, on pense différemment.

L'époque du Charlot des Temps modernes est largement dépassée.

C'est un très bon exemple. Quand le système ne marche pas bien, on est exactement dans la situation de Charlot où l'homme est asservi à la machine. Donc, la préoccupation centrale dans la conception est que l'interaction homme-machine soit bien au service de l'homme et non pas l'inverse, comme cela se passait au début de l'automatisation industrielle.

Autre aspect : comment se présente le rapport robot/réalité virtuelle, et comment l'homme fonctionne-t-il dans un environnement dit de réalité virtuelle ? Quelles sont les incidences sur son propre fonctionnement intérieur ?

À partir d'une description assez simple, on peut comprendre ce qui se passe. Les implications plus profondes, philosophiques, sont plus complexes à décrire. Que se passe-t-il ? Le but du système de réalité virtuelle est d'obtenir que l'opérateur ait la conviction qu'il se trouve physiquement, réellement, dans l'environnement qui est présenté par le système virtuel. On peut prendre l'exemple d'un champ avec un lapin.

Supposons que je sois connecté à un système de réalité virtuelle et que je me croie dans un champ avec un lapin devant moi. Pour cela il faut et il suffit – mais le « suffit » c’est difficile à réaliser – que tous les signaux que m’envoie cet environnement virtuel excitent mon système sensoriel exactement de la même façon que le ferait un vrai champ avec un vrai lapin. Dans les premiers temps de la réalité virtuelle, vers 1990, on a cru qu’exciter la vision et éventuellement l’audition était suffisant. En fait, on constate ici, dans l’appartement où nous sommes présentement et réellement, que la vision et l’audition ne sont pas les seules en jeu dans la compréhension de cet environnement réel. Pour croire que je suis assis sur une chaise dans cet appartement, tout mon système sensoriel est impliqué, en particulier tout ce qui concerne le toucher, la peau, mais aussi l’odorat, etc. La difficulté pour créer un bon environnement virtuel consiste à exciter convenablement, non pas seulement la vision et l’audition, ce qui n’est déjà pas facile, mais tous les sens. Si cette excitation est parfaite, je n’ai aucune raison de ne pas croire que je suis dans un champ avec un lapin devant moi. Maintenant, il reste une autre difficulté. Quand je suis présent dans un environnement, comme ici, je peux l’être d’une manière statique ; je regarde ; le décor ne bouge pas relativement à moi. Au cinéma, on parvient à être présent dans la scène d’une manière statique. Or, je souhaite être présent d’une manière dynamique et, si je touche cette table et que je ne ressens pas le contact du bois (contact et identification du bois par le toucher) je ne vais pas croire qu’il y a une table. Le problème de l’interaction lorsque l’homme se meut dans l’environnement virtuel, impose que cet environnement virtuel réponde comme répondrait un environnement réel. Si tout est bien réussi, il sera très difficile à l’opérateur de penser qu’il n’est pas dans un vrai monde avec une vraie table ou, ici, dans un vrai champ de carottes avec un vrai lapin.

Réussir à satisfaire tous les sens humains, les cinq sens habituels, mais aussi la cénesthésie, la kinesthésie, la proprioception plus généralement, il est probable que cela ne soit pas pour tout de suite. Certes on peut se laisser fasciner par certaines excitations, en oubliant que les autres sens ne sont

pas sollicités. N'y aurait-il pas le risque d'une forme d'addiction, à prendre l'habitude de fonctionner en permanence dans ces mondes ?

Ce sont deux questions différentes. Pour la première, nous avons aujourd'hui deux handicaps principaux pour construire des environnements virtuels parfaits. En effet, pour réaliser un système parfait, il faut déjà connaître parfaitement le système sensoriel humain. Et, contrairement à ce que l'on pourrait croire, à consulter physiologistes, médecins, neurologues et autres spécialistes du corps humain, nous ne savons pas assez de choses pour tenter d'exciter parfaitement le système sensoriel humain. En particulier, nous ne savons pas comment les sens coopèrent ni comment ils peuvent se substituer l'un à l'autre. À la vision, je peux substituer par exemple le toucher. La coopération entre tous les sens et leurs substitutions sont trop mal connues. Tant que l'on n'aura pas un bon modèle du système sensoriel complet de l'homme, on ne pourra pas implanter les bonnes solutions, mais on peut toujours espérer que cela s'améliorera.

Le second problème devrait lui aussi s'améliorer. Lorsque l'on est dans un environnement dynamique, ne serait-ce que sur le plan de la vision, les images que l'on doit proposer sont déjà très complexes. Elles doivent être traitées très vite, à la même vitesse que nos yeux traitent les images (autour de 30 hertz par œil pour éviter les sensations de saccades). Or, à partir d'un certain niveau de complexité, les ordinateurs ne répondent plus tout à fait. Ils sont un peu en retard sur les capacités visuelles humaines. Voilà la seconde limitation, mais elle est provisoire compte tenu de l'évolution de la vitesse des ordinateurs aujourd'hui, même si on se rapproche certainement des limites technologiques. En ce qui concerne la première, on peut faire des progrès, mais il est difficile de prévoir si l'on va réussir dans des délais raisonnables. Le problème posé est assez complexe : il s'agit de définir à partir de quel niveau de conviction l'opérateur commence à croire à l'environnement virtuel dans lequel il est immergé. D'abord, cela dépend beaucoup de chaque individu, de son passé, de ses tendances personnelles, de son désir. Quand j'étais plus jeune, je me laissais capter par des systèmes

vidéos ; aujourd'hui ces systèmes ne m'intéressent plus. Maintenant, quand j'en utilise un, je n'ai aucune difficulté à le quitter pour répondre à la question posée par quelqu'un qui vient de me parler. Dans certaines circonstances et chez certaines personnes, ces systèmes peuvent, en effet, fonctionner un peu comme le tabac, comme une addiction. Cela peut d'ailleurs être fait dans ce but. On voit bien, en particulier dans des pays avancés sur ces systèmes, comme le Japon, qu'il existe une catégorie de population que l'on pourrait qualifier de « droguée », que ce soit par l'Internet ou les jeux vidéos, plus généralement par des applications de l'informatique plaisantes ou utiles au premier abord, mais dont certains finissent par ne plus pouvoir se détacher. Cela peut en effet s'assimiler à jouer dans les casinos ou prendre de la drogue. Cela présente sans doute un certain danger, mais c'est le lot de tout progrès technologique qui peut être bon ou mauvais suivant l'usage qu'on en fait. En l'occurrence le danger est moins évident que dans le cas d'une drogue ou du tabac car la méthode pour arrêter est plus simple et moins stressante physiologiquement parlant. Cependant, il y a un risque à prendre en compte. Pour revenir au groupe de travail de l'Académie des Technologies, une partie de notre étude est consacrée à ces problèmes d'addiction aux machines en général. Il existe bien des types de machines avec lesquelles on peut pervertir des populations, surtout les plus faibles psychologiquement, évidemment.

Quand on voit la fascination que les systèmes audiovisuels produisent, au point que certains peuvent rester des heures devant, on imagine ce qui risque de se passer si la réalité virtuelle se perfectionne au point de réaliser des environnements semblables ou seulement proches du réel. Le risque est d'aller vivre dans un autre monde.

Comme on vient de le dire, il faut signaler ce risque d'addiction. D'un point de vue scientifique, si nous arrivions à un tel résultat de simulation, nous aurions résolu le problème de la compréhension du fonctionnement du système sensoriel humain. De ce côté, ce serait une grande victoire, de l'autre, le piège serait tendu. Comme toujours, une

avancée scientifique ou technologique oblige à réfléchir sur la façon de prévenir un mauvais usage de ce progrès.

Cette question intéresse notoirement les neurosciences. D'ailleurs, l'intelligence artificielle interroge ce domaine, et, réciproquement, les neurosciences bénéficient des avancées de l'intelligence artificielle. D'un point de vue plus philosophique, pour ne pas dire poétique, ces mondes virtuels informent-ils sur la « réalité du réel » ?

Supposons que, dans mon monde virtuel presque parfait, je prenne mon lapin par les oreilles. Cela suppose que je sente bien les oreilles du lapin qui gigote. Quand j'étais enfant, mes parents avaient des lapins ; on les prenait par les oreilles. Un lapin, ça gigote beaucoup ; on sent les poils, on sent beaucoup de choses. Si mon système de réalité virtuelle satisfait aux propriétés que j'ai évoqué précédemment, je peux être convaincu que je tiens un vrai lapin par les oreilles. Cela signifie que je me suis téléporté depuis la pièce où je me trouve dans un monde virtuel qui, pour mon cerveau, existe. Cette réalité mentale aura une influence sur mon comportement physique. Pourtant il peut me rester des traces de mon environnement réel. D'une part je suis bien dans un champ où je tiens un lapin par les oreilles comme me l'indique tout mon système sensoriel. D'autre part, si je suis par exemple dans une pièce réelle où il fait très froid, comme un réfrigérateur, je peux y être relativement insensible. Ainsi, le niveau de conviction que je vais avoir sur la réalité du phénomène que je ressens avec le lapin aura une incidence tout à fait importante, non seulement sur mon comportement mais aussi sur mon statut physiologique. Je suis persuadé, bien que n'en ayant pas fait personnellement l'expérience, que si dans un monde virtuel il fait extrêmement chaud, je peux enlever ma chemise alors que je peux être dans une pièce où il gèle. Cela ne fait que reproduire des phénomènes qu'on trouve par ailleurs dans les rêves, ou encore chez des personnes qui ont des puissances de concentration importante comme certains gourous en Inde. On dit qu'ils arrivent à faire fondre la neige autour d'eux par leur concentration mentale. Le monde virtuel en lui-même n'a aucune

réalité physique. Sa réalité physique, ce sont les états des circuits intégrés de l'ordinateur, même quand le système est au repos parce que j'ai enregistré mon programme pour ne pas avoir à le recomposer, mais il n'existe pas. En revanche, je suis, mentalement, en partie physiquement dans ce monde virtuel par les conséquences de mon mental, et évidemment en partie physiquement dans la pièce où je vis la démonstration. Donc, il semble que la nuance soit assez claire entre réalité matérielle ou physique et réalité mentale. Cependant, il n'est bien entendu pas question de résoudre le problème de la réalité au sens philosophique du terme.

Le fait de savoir si je suis dans un champ de carottes ou si je suis dans mon appartement dépend de la prégnance de la simulation. Or, quelle que soit la prégnance de la réalité virtuelle, si la température de mon environnement descend jusqu'à moins trente, il est à craindre que la réalité virtuelle perde de sa réalité.

Sans doute. Cela dépend du niveau de prégnance relative des deux environnements en présence, ou encore, d'agression que vous subissez. Ce n'est que la reproduction d'un phénomène que l'on peut constater. Un enfant amateur de football, regarde un match à la télévision. Vous lui demandez d'aller chercher une bouteille dans le réfrigérateur ; il jurera ultérieurement qu'il n'a jamais entendu qu'on lui a formulé une telle demande. Il était dans son match. Le constat de ces phénomènes est ancien. L'apport de ces avancées technologiques, c'est que, premièrement, grâce à elles, on peut mieux les comprendre et les reproduire scientifiquement. Deuxièmement, on peut en tirer des applications qui peuvent transformer nos vies de façon importante et intéressante si on sait bien s'en servir. Évidemment, cela n'apporte pas grand chose à la question philosophique du réel, pas davantage que ne l'ont fait les philosophes pendant 2 500 ans. Cela ne lève pas non plus le problème de la religion, ni aucun des autres problèmes posés par la métaphysique.

Simple suggestion conclusive, ne serait-il pas plus juste d'intituler cette communication : « Un vrai-faux lapin dans un vrai-faux champ de vraies-fausses carottes ? »

Bibliographie

G. Burdea, P. Coiffet, *Virtual Reality Technology*, New-York, Wiley Interscience, 2003.

François Chatelet (sous la direction de), *La philosophie au XX^e siècle*, Paris, Librairie Hachette, Collection Marabout université, tome 4, deuxième édition, 1979.

Philippe Coiffet, *Robot habilis, robot sapiens ; histoire, développements et futurs de la robotique*, Paris, Éditions Hermès, 1993.

Philippe Coiffet, *Mondes imaginaires*, Éditions Hermès, 1995.

V. V. Nalimov, *Les mathématiques de l'inconscient*, Paris, Éditions du Rocher, 1996.

P. Rabischong, *Le programme homme*, Paris, P. U. F, 2003.

LE RÉEL DES ANIMAUX

Pascal Picq*

Qu'est-ce que le réel des animaux ? Notre conception occidentale de l'animal machine les considère comme des engrenages mécanistes. Ces machines naturelles se révèlent des automates qui réagissent aux stimuli venant de l'environnement. Nous sommes émerveillés par de si beaux assemblages qui, s'ils n'ont pas été conçus par l'homme, le sont forcément par une intelligence supérieure. De l'œil de la providence au programme adaptationniste de la biologie de l'évolution, on a tout de même progressé. Le réel des animaux s'articule ici selon deux dimensions : comment les animaux subissent le monde et comment les animaux se représentent le monde.

Si l'on fait abstraction des aspects parfois naïfs – panglossiens – des études sur l'adaptation des espèces, on tire quelques beaux enseignements sur l'adaptation vue au travers de quelques variables simples de la physique, comme les masses du corps rapportées à ses surfaces, que ce soit pour vivre sous différentes latitudes ou pour digérer certains types

* Laboratoire de Paléanthropologie et Préhistoire, Collège de France, 11, place Marcelin-Berthelot, 75231 Paris cedex 05. Courriel : picq.anthrope@wanadoo.fr

de nourritures. Galilée est le premier à avoir envisagé la forme des os des animaux sous cet angle. Un éphémère a plus à se soucier des forces de Van der Vals que de la pesanteur alors qu'un éléphant qui rentre dans l'eau a des soucis plus lourds. Que dire du temps, autre variable sur laquelle joue l'évolution, entre l'éphémère et l'homme. Cela nous amène à la perception du monde extérieur, à ses représentations. Les animaux perçoivent le monde grâce à leurs organes des sens et à leurs sensations qui mobilisent des unités physiques et, qu'on le sache enfin, construisent des images mentales. C'est peut-être de l'appréhension des grands singes à tomber des arbres qu'est apparue la conscience de soi. La prise de conscience du réel des animaux reste un domaine encore mal exploré. Qu'on se rappelle tout de même que dès que les plus savants des hommes – comme les physiciens – inventent quelque chose, il se trouve que des animaux en font déjà usage (ondes radar, sonars, électricité, électromagnétisme...), mais eux ne l'ont pas fait exprès.

Qu'est-ce que le réel des animaux ?

Une telle question proposée dans le cadre d'une réunion organisée par des physiciens fait presque l'effet d'une petite révolution copernicienne. Pour la majorité des physiologistes, soutenus par des généticiens réductionnistes, les animaux sont des machines faites pour fonctionner ou de simples valises à transporter et diffuser des gènes. Pas d'état d'âme pour ces chercheurs qui refusent toute âme aux animaux, ce qui dispense de toute sensibilité – pour ne pas dire de responsabilité – vis-à-vis de leurs objets d'expérimentation.

Les rapports entre l'animal et la physique, ou plus précisément entre les conceptions de l'animal et l'évolution des connaissances en physique, ont rarement été explorés. Du temps de René Descartes et de l'animal machine, s'impose une vision mécaniste du monde qui embrasse la mécanique céleste d'Isaac Newton comme la circulation sanguine de William Harvey. Tout n'est que fluide et surtout automates. Plus tard, les avancées de la physique pénètrent le monde des ondes et

L'on découvre que les chauves-souris comme les dauphins détectent leur entourage selon des moyens à peine inventés par le génie des hommes. En fait, les hommes ont tendance à regarder les animaux sur la base de leurs inventions et de leurs productions. Est-ce un hasard si l'essor de l'électricité et de l'électronique forme un parallèle avec les conceptions behavioristes de l'animal dont le cerveau s'apparente à une boîte noire : un stimulus externe provoquant une réponse sans que l'on s'intéresse à ce qui se passe dans le cerveau, simple amas connectique de neurones ? Fort heureusement, les sciences de l'information et les sciences de l'informatique amènent aux notions d'intelligence artificielle et à l'émergence des sciences cognitives. Et le réel des animaux dans cette affaire ? On se dispute encore sur les notions de représentations mentales.

Aujourd'hui la physique, notamment la physique de la matière et la cosmogonie, décrit des mondes à de multiples dimensions qui dépassent notre perception du réel. Alors que la physique propose de telles constructions, comment expliquer que la majorité des biologistes et des philosophes récusent encore la notion de représentation chez les animaux ? En dépit des progrès accomplis en psychologie animale et en éthologie, alors même que les émotions s'installent dans les sciences cognitives, le réel des animaux attend sa révolution copernicienne.

Dans cette contribution, je me demanderai, dans un premier temps, comment l'adaptation des espèces se trouve expliquée en l'abordant au travers de quelques grandeurs simples de la physique – autrement dit comment les animaux subissent le monde - et, dans un deuxième temps, comment les animaux perçoivent le monde.

Les os et la gravitation terrestre

Galilée se distingue comme l'un des grands précurseurs de ce qu'on appelle aujourd'hui l'*allométrie*. Ce joli terme englobe les études sur la taille et ses conséquences. Dans la nature, être gros ou petit ne pose pas

les mêmes problèmes pour se déplacer, pour affronter un prédateur ou pour consommer certains types de nourritures.

Galilée invente la biomécanique osseuse en remarquant que les os des petits animaux sont minces et souvent incurvés alors que ceux des grands animaux se montrent plus massifs avec des tubérosités plus fortes. Un regard rapide de la souris à l'éléphant – un grand classique en allométrie générale – révèle que le poids du squelette représente environ 2 pour cent de la masse corporelle totale de la souris alors qu'il atteint 20 pour cent chez l'éléphant. Ces différences sont liées à l'adaptation structurale de l'os en fonction de la taille de l'animal.

Prenons un animal dont la taille mesurée de l'arrière du crâne à la naissance de la queue est de 1 mètre. Doublons la taille de la bête, qui mesure alors 2 mètres. Dans cette manipulation, les surfaces de son corps s'élèvent au carré, soit d'un facteur 4 alors que sa masse augmente au cube, soit d'un facteur 8. Maintenant triplons la taille de la bête et cette fois les surfaces ont été multipliées par 8 et la masse par 27. C'est là que les os craquent. En effet, les os doivent supporter le poids du corps, surtout pendant les phases dynamiques, sans trop se déformer, sinon ils accumulent des microfractures avant de se briser.

Un peu de physique des matériaux nous apprend qu'une structure assimilée à une poutre limite d'autant plus l'amplitude des déformations imposées par les forces extérieures qu'elle possède une section transversale d'autant plus grande (le second moment d'inertie pour les flexions et le moment polaire d'inertie pour les torsions). Toutefois, ces capacités de résistance sont proportionnelles aux surfaces alors que les sollicitations le sont par rapport aux masses. Par conséquent, les animaux de plus grande taille ont des ossements dont les sections sont relativement plus grandes. Tout l'art de l'allométrie tient dans ce mot : relativement.

Cependant, cette adaptation géométrique ne suffit pas. Si un savant mal inspiré tentait de gonfler une souris à la taille d'un éléphant, tout en prenant la précaution d'augmenter proportionnellement les sections

des os pour les raisons expliquées plus haut, notre souris-éléphant aurait plus de la moitié de son poids en squelette. Une chimère complètement ossifiée et statufiée. D'autres transformations opèrent en fonction de la taille, notamment les relations spatiales entre les parties des membres. Alors que les animaux de petite taille possèdent des membres fléchis avec des angles fermés entre, par exemple, le fémur et le tibia, ces angles sont ouverts, plats chez les grands animaux. Cet arrangement géométrique réduit les bras de levier associés aux flexions. On dit que les éléphants, comme tous les mammifères de grande taille, sont stylogrades, en référence aux « styles » des colonnes grecques. Voilà comment quelques grandeurs de la physique – des masses, des surfaces et de la gravitation – proposent des explications simples et élégantes de la diversité des morphologies des squelettes chez les animaux.

Historiquement, la biomécanique osseuse débute avec l'invention et l'usage des rayons X. L'ingénieur Carl Culmann et le physiologiste Kaspar Wolff déduisent la loi des trajectoires de l'observation des orientations des trabécules de l'os spongieux du col du fémur et de sa comparaison avec l'arrangement des poutrelles de la flèche d'une grue élévatrice. Cette loi empirique admet que les trabécules s'orientent de telle sorte qu'elles s'alignent avec les directions des contraintes principales. Toutefois, cette loi empirique conduit à certaines incompréhensions, d'autant qu'elles sont établies dans un contexte fixiste, autrement dit non évolutionniste. En déduire que la morphologie des os – le terme *morphologie* est inventé en 1802 par le poète Johann Goethe, féru de *Natürphilosophie*, dans un contexte tout aussi fixiste – autrement dit leur forme et leur taille, tend à réduire au maximum les déformations. Voilà bien un raisonnement d'ingénieur qui ne s'applique pas à la Nature. En fait, des études expérimentales montrent que la morphologie s'adapte – loi de Roux – afin de maintenir le niveau des déformations dans un domaine d'amplitude acceptable. L'os est un matériau vivant et rappelons que, chez les chevaux par exemple, c'est l'intensité des déformations qui induit les changements d'allure, ce qui donne une autre vision du réel physique des animaux. On avait oublié Galilée et la dynamique.

Question de chaleur et de régime

Ces petites histoires de surfaces et de volumes concernent d'autres aspects du réel des animaux, tels que l'adaptation au climat en fonction de la latitude. Pour des populations d'une même espèce vivant sous des latitudes très différentes, comme les tigres ou les mammouths en d'autres temps, ou des espèces très proches en termes de parenté – on dit phylogénétiquement proches – on constate que les individus sont de plus grande taille depuis l'équateur vers des latitudes plus hautes. Être plus grand favorise les volumes par rapport aux surfaces et cela présente un avantage pour conserver la chaleur du corps. C'est la loi de Bergman.

À cela s'ajoutent des proportions corporelles qui favorisent des membres relativement plus courts. Les membres pouvant s'assimiler à des cylindres, ils sont propices à la déperdition de chaleur. Les différences morphologiques entre les hommes de Neandertal et ceux de Cro-Magnon ayant vécu il y a 40 000 ans en Europe montrent que les premiers – plus trapus – ont évolués dans le cadre de l'Europe des temps glaciaires alors que les autres – des *Homo sapiens* tout comme nous, plus longilignes – viennent d'Afrique. De telles différences se rencontrent entre les populations humaines actuelles, mais dans des amplitudes moindres.

Ces histoires de surface et de volume se retrouvent aussi pour le régime alimentaire. Pourquoi ne trouve-t-on pas d'animal mangeur de feuille – folivore – de moins de un kilogramme et d'insectivore de grande taille ? Ce n'est pas qu'une question de goût ou d'opportunité. Manger des feuilles, surtout pour un animal qui vit dans les arbres des forêts tropicales, rien de plus facile. Il n'y a qu'à tendre la main et à consommer. C'est au niveau de la digestion que cela se gâte. Les feuilles, fort abondantes, sont de piètre qualité nutritive. Afin d'en tirer nutriment et subsistance, il faut du temps. D'où l'estomac sacculé des bovidés et des singes colobes ou le gros cæcum des chevaux et des gorilles. Là, toute une population d'enzymes et de bactéries – la flore intestinale – œuvre pour désintégrer les hydrates de carbone et donner des

produits dérivés assimilables pour l'organisme – on passera sur la biomécanique masticatoire et la morphologie des dents qui brisent physiquement ces grosses molécules rébarbatives. Toute cette machinerie requiert un appareil gastro-intestinal volumineux qui atteint sa limite inférieure chez des animaux de petite taille.

On l'aura compris, les écologistes et les physiologistes aiment les lois empiriques. L'une d'elles est celle de Jarman-Bell qui s'applique aux espèces végétariennes. Plus celles-ci sont de taille importante, plus elles ont tendance à consommer des nourritures de moindre qualité nutritive mais très abondantes dans l'environnement (forte biomasse). Du fait qu'elles sont de plus grande taille, toutes les parties de leur corps sont plus grandes, une lapalissade qui joue un rôle très important pour l'adaptation des espèces. Comme l'appareil gastro-intestinal est plus grand, alors il présente des volumes et des longueurs qui admettent un transit très long, rendant la consommation d'herbes et de feuilles rentable. Cela correspond aussi au fait qu'un animal de plus grande taille se déplace plus aisément sans dépenser beaucoup d'énergie et, comme on l'a vu, il perd moins de chaleur par unité de masse corporelle. Autrement dit, leur métabolisme est relativement moins important. Voilà comment en faisant varier quelques variables simples – surfaces, volumes, tailles, masses, énergie – on explique les grandes tendances adaptatives des espèces. Inversement, un animal de petite taille se concentre sur des nourritures hautement énergétiques et nutritives qui s'assimilent rapidement dans le petit intestin. Les insectivores comme la musaraigne consomment plusieurs fois leur propre poids de nourriture par jour. Fort heureusement, un éléphant ne mange pas plusieurs fois son poids de végétaux par jour.

Bien entendu, il en va des règles empiriques comme de celles de la grammaire : les exceptions foisonnent. Ces lois décrivent des contraintes théoriques que certaines adaptations contournent. En fait, les espèces ne présentent pas que des niveaux divers d'une même courbe d'adaptation. Si la loi de Jarman-Bell s'observe aussi chez les singes, il y a des exceptions notables, comme les chimpanzés et les hommes. L'homme

est un animal de très grande taille qui maintient un régime alimentaire omnivore composé de nourritures de très bonne qualité nutritive. Vue notre taille corporelle, nous devrions théoriquement être des végétariens, mais notre appareil gastro-intestinal est celui d'un frugivore-omnivore de grande taille. Une aberration en quelque sorte, d'autant que nous sommes affublés d'un cerveau relativement développé. Or notre encéphale consomme entre un quart et un cinquième de notre métabolisme quotidien. Un vrai gâchis écologique. On pense que cela a été rendu possible par la première expérience de chimie : la cuisson. Quand, vers – 700 000 ans, des femmes et des hommes ont eu l'idée de cuire des végétaux, comme des tubercules, l'amidon rendu plus digeste a réduit l'effort énergétique nécessaire à la digestion, libérant ainsi de l'énergie pour le développement et l'entretien de notre cerveau. Selon l'aphorisme de Lavoisier : « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Sans cette innovation due à nos ancêtres *Homo erectus* nous n'aurions pas de prix Nobel de physique.

De la chute des corps à la conscience

La taille et l'accélération contraignent la dynamique de la locomotion, ce qui se conçoit facilement. Cela devient un peu plus compliqué lorsque l'on vit dans les arbres. Le problème, c'est la chute des corps. Toujours d'après Galilée, que l'on soit un petit ou un grand singe ne change rien à l'accélération subie entre la branche lâchée par inadvertance et le sol obstinément présent. La différence intervient au niveau du contact avec le sol. Le transfert d'énergie cinétique au cours du choc secoue méchamment le petit singe, mais disloquera le corps du grand.

Si on observe les petits singes dans les arbres, on les voit sauter et bondir avec autant de légèreté que d'insouciance. S'ils manquent leur prise, ils tombent mais se rattrapent vite. Une chute est rarement mortelle. Les singes de taille moyenne – entre 5 et 10 kilogrammes – se montrent plus circonspects. On les voit moins téméraires et plutôt que de bondir entre les branches, ils s'étendent le plus possible pour assurer

leurs prises. Cela devient encore plus problématique pour les grands singes comme les gorilles, les orangs-outans, les chimpanzés et même les gibbons, pourtant de merveilleux acrobates. L'étude des collections de squelettes de gibbons révèle que près d'un tiers des individus a subi des fractures ! Quand on sait que ces singes vivent dans la cime des arbres à plus de 30 mètres de hauteur, on commence à s'inquiéter.

Les plus étonnants des grands singes sont les orangs-outans, les plus grands des mammifères vivant dans les arbres. Les gorilles restent au sol ; il est très rare de les voir dans les branches, d'autant qu'ils vivent dans des forêts secondaires où les nourritures se trouvent près du sol. Les orang-outans sont de véritables « quadrumanes » extrêmement prudents dans leurs déplacements. Tous les grands singes se comportent ainsi, toute chute étant dangereuse. À les observer, plusieurs primatologues pensent que les origines de la conscience de soi viennent de ces conditions de déplacement dans un espace à trois dimensions. Penser que la conscience de soi provient d'une question de gravitation, c'est reprendre, sous un angle très physique, l'idée de l'insoutenable légèreté de l'être. Cependant, l'hypothèse est sérieuse puisque ces grands singes affichent des aptitudes cognitives très humaines comme la reconnaissance dans un miroir, des stratégies sociales complexes, l'usage d'outils, des rudiments de cultures et ce qui touche à la théorie de l'esprit. Quand les ancêtres africains des premiers hommes sont descendus des arbres, ils avaient déjà une longue expérience du poids de la conscience.

À quel âge apparaît la conscience de soi chez les enfants ? On ne peut les blâmer de mal maîtriser les lois de la chute des corps. Toutefois, même les adultes arrivent à s'agacer de leur propension à courir spontanément et à chuter tout aussi vite. Et pour cause. Chez un enfant de deux ans, la tête représente une plus grande proportion du poids du corps alors que les membres sont relativement plus courts – c'est l'allométrie ontogénétique. De ce fait, le centre de gravité se situe au niveau du sternum au lieu du bassin. Résultat, nos chers enfants démarrent plus vite, mais chutent d'autant mieux avec une accélération foudroyante, mais allez leur expliquer cela.

Avec le temps, tout est relatif

Un éphémère ne vit que 24 heures, pas même le temps d'un courant d'air existentiel. Quant à l'homme, il se surprend à vivre de plus en plus longtemps, et cela complique considérablement son rapport à la vie et à la société. Si on se cantonne aux mammifères, on constate que l'homme se distingue parmi les rares espèces qui vivent très longtemps, privilège partagé avec de rares animaux, le plus souvent bien plus corpulents que lui.

Les temps de la vie – ce qu'on appelle les paramètres d'histoire de vie – façonnent les rapports au réel, ce réel se composant à la fois de l'environnement physique et du contexte social. On distingue volontiers deux types de rapport à la vie appelés stratégie r et stratégie K. Ces lettres désignent des paramètres d'équations qui décrivent les modalités d'adaptation des espèces en fonction de leur relation à l'environnement. Les espèces dites r se reproduisent rapidement. Les femelles mettent au monde des portées nombreuses avec des petits immatures, aveugles et à croissance rapide. On pense aux rongeurs, aux lapins et à leurs prédateurs. L'investissement parental échoit à la mère et se concentre sur l'allaitement. L'éducation des jeunes reste très limitée chez les espèces herbivores, elle est plus soutenue chez leurs prédateurs. Ce type de stratégie adaptative répond à des environnements dont les ressources varient drastiquement au fil des saisons comme au fil des années. Les espèces qui en dépendent réagissent de manière quantitative, jouant sur le nombre et l'opportunité.

Il en va tout autrement pour des espèces qui vivent en meilleur équilibre avec leur environnement et engagées dans une compétition plus intense. Les plus caractéristiques à cet égard sont les singes mangeurs de fruits, notamment les chimpanzés et les hommes. Les femelles ne mettent au monde qu'un seul petit au terme d'une longue gestation. Ce petit naît dans un état précoce et connaît ensuite une longue dépendance auprès de sa mère, puis du groupe social. Il va apprendre à rechercher ses nourritures dans un environnement

complexe et aussi à développer des compétences sociales. Tout cela prend du temps et l'investissement parental est considérable, surtout pour les femelles.

La durée de vie des singes frugivores est longue pour des espèces de leur taille, de deux à trois décennies. Elle est encore plus longue pour les grands singes et les hommes. Ce long temps de l'enfance est nécessaire pour des espèces qui assurent leur survie à partir de ressources de nourritures les plus riches – fruits, viande, jeunes pousses, fleurs, insectes, etc. – mais dont la distribution est discrète à la fois dans l'espace et dans le temps. Leur rapport au réel se construit sur l'accumulation d'expériences et de connaissances. Les singes capucins d'Amérique du sud se montrent très intelligents. Ils usent de tous les moyens pour obtenir et consommer des nourritures. Ils n'hésitent pas à tenter de nouvelles expériences et s'avèrent doués pour l'usage d'outils. Cependant, quand un individu trouve un moyen de résoudre un problème, les autres n'ont pas l'air de comprendre. Au lieu d'imiter, ils continuent à procéder par essai et erreur.

Il en va autrement chez les chimpanzés, les orangs-outans et les hommes. Ils se montrent tout aussi audacieux. Cependant, ceux qui observent imitent souvent les innovations des autres et il y a un transfert de savoir-faire. Cela donne des traditions et des... cultures. C'est parce que les grands singes ont de longues vies et surtout une enfance très longue qu'ils peuvent développer ces compétences. Les capucins, pourtant très évolués sur le plan cognitif – la taille relative de leur cerveau rapportée à celle du corps, le coefficient d'encéphalisation, est aussi important que chez l'homme – ne disposent pas du temps nécessaire pour développer les aptitudes sociales et culturelles des grands singes. Bien que les chimpanzés soient relativement moins encéphalisés que les capucins, ils disposent du temps de la vie, ce qui change leur rapport au réel et surtout aux autres.

Ce n'est que récemment que le temps a pris autant d'importance dans la compréhension des stratégies adaptatives des espèces mais aussi au sein des processus évolutifs. On sait fort bien que l'homme est une

espèce assez lente qui consacre environ un quart de sa vie à atteindre l'âge adulte. La sélection naturelle joue sur les temps de l'ontogenèse. Ce qu'on appelle les hétérochronies proposent des processus aussi simples qu'élégants pour expliquer des différences parfois spectaculaires entre des espèces. Il suffit, en théorie, de raccourcir ou de prolonger les courbes de développement ontogénétiques des chimpanzés pour obtenir respectivement un bonobo ou un gorille. On n'a pas manqué d'imaginer qu'un tel processus soit intervenu pour passer d'un lointain ancêtre proche du chimpanzé à l'homme. Il suffirait que le temps relatif d'une période de l'ontogenèse vienne à être relativement plus long ou plus court pour passer du grand singe à l'homme. Ainsi, le temps rend notre statut d'humain très relatif. Voilà qui affecte encore douloureusement ceux, hélas si majoritaire en ce monde, qui refusent obstinément ce rapport au réel de notre place dans la Nature.

D'autres réels à imaginer

L'homme et les grands singes vivent dans un monde dominé par la pesanteur et le temps. Nous vivons dans un monde à quatre dimensions, mais il a fallu attendre longtemps pour comprendre la relativité de tout cela. L'homme, toujours envieux de ce qu'il ne peut pas être, aimerait parfois faire comme certaines bestioles, tenir sur l'eau ou pouvoir s'accrocher au plafond. Rares sont les hommes, même les croyants les plus intégristes en la métempsycose, qui désirent devenir des éphémères ou des mouches. Au-delà de ces perversités entomologiques, comment concrétiser le monde des insectes ? Quand on arrive à l'échelle des moustiques, les forces de surface ou de contact deviennent relativement plus fortes que celles de gravitation. Il est plus difficile à un éphémère de décoller de la surface de l'eau que de risquer de couler par pesanteur. De grosses bêtes comme les hommes peinent à imaginer cela, sauf au moment où le corps du plongeur rencontre la surface de l'eau après un plongeon de 10 mètres mal négocié. Revenons au réel des animaux. Le superbe film *Microcosmos* nous montre comment une simple goutte d'eau devient une bombe gigantesque quand on est une fourmi.

À propos de fourmis ou autres scarabées, on s'étonne que ces insectes soient capables de porter des objets des dizaines voire des centaines de fois plus lourds qu'eux, mais, à leur échelle, le poids compte moins. Plus agaçant : le bourdonnement des mouches et des moustiques. Comment font-ils pour entretenir un vol avec des battements d'ailes aussi rapides, à des fréquences aussi infernales ? Chez les mouches, les ailes, les muscles et la cage thoracique entretiennent un système de résonance qui défie notre génie. Décidément agaçants ces insectes qui échappent à notre entendement, mais que les performances éclairées par la physique rendent si étonnants. On conçoit que le microcosmos des insectes soit si différent. Pour autant, les animaux plus familiers qui partagent notre monde macroscopique n'ont pas forcément les mêmes perceptions du réel que nous.

Les perceptions du réel

Comment pénétrer la perception du réel des animaux ? Les seuls moyens qui s'offrent à nous reposent sur la physique et, de façon moins perceptible, sur la chimie. Ce qui nous vient à l'esprit, à nous les singes qui chérissons le sens de la vision, ce sont les fréquences spectrovisuelles. La plupart des mammifères scrutent le réel en bichromie. Les félins aux yeux aussi magnifiques qu'énigmatiques ne possèdent qu'un cinquième des cônes que l'on trouve dans les yeux des singes. Ils voient ce qui les entoure dans un dégradé de gris et de verts, avec un soupçon de bleu et une touche de rouge. Plutôt impressionniste selon notre propre vision du monde ! En revanche, la plupart des mammifères jouissent d'une excellente vision nocturne grâce à un grand nombre de bâtonnets et à un tapis réfléchissant tendu derrière la rétine, le *tapetum lucidum*. C'est ce qui nous impressionne tant lorsque l'on croise leur regard la nuit. C'est un vieil héritage qui nous vient du temps où nos lointains ancêtres mammifères de l'ère secondaire se cantonnaient à la vie nocturne alors que les dinosaures dominaient le monde diurne. Depuis, quelques rares lignées de mammifères ont perdu ce tapis réfléchissant, notamment les singes adeptes de la vie diurne dans les arbres.

Cela inclut l'homme, évidemment. Certaines espèces ayant connu cette évolution mais étant retournées à la vie nocturne – comme les tarsiers du sud-est asiatique et les singes de nuit d'Amazonie – compensent cette perte par le développement d'yeux énormes. Chez le tarsier, chaque œil est plus grand que le cerveau ! On retrouve la même adaptation chez les oiseaux de nuit, mais chez les oiseaux comme chez leurs ancêtres dinosaures, il n'y a jamais eu de *tapetum lucidum* en raison de leurs mœurs diurnes.

Les singes voient en trichromie, ce qui permet de mieux repérer les fruits. L'histoire évolutive des singes, des arbres et des fruits offre un des plus beaux exemples – coloré – de ce qu'on appelle la co-évolution. Cependant, voir les fruits mûrs est une chose, aller les cueillir en est une autre. Pour marcher et courir sur les branches et bondir de branche en branche, mieux vaut bien apprécier les reliefs comme les profondeurs de champ. D'où les yeux situés de part et d'autre de la racine du nez. Cette disposition permet une vision stéréoscopique en relation avec un traitement très élaboré des signaux visuels au niveau des aires du cerveau, les aires visuelles, très développées, qui reconstruisent les images de l'environnement. Chez les animaux, les stimuli perçus par l'œil droit sont projetés sur les aires visuelles gauches du lobe occipital et réciproquement. Cela s'opère par le chiasma optique : le croisement des nerfs optiques. Chez les singes, les yeux rapprochés font que leurs champs visuels respectifs se superposent, mais au lieu que ce champ de vision commun soit traité par les deux aires, il y a une partition de ce que chaque œil que perçoit. C'est le cerveau qui assure la superposition des images et livre une vision en relief. On peut imaginer comparer notre vision du réel avec d'autres mammifères, comme les chiens, capables de déceler un mouvement à grande distance, mais qui ne voient pas goutte au bout de leur nez. Les vibrisses, les longs poils plantés de part et d'autre du museau compensent cela. L'univers visuel des chiens nous apparaît bien monotone, alors que nous n'arriverons jamais à nous représenter leur univers olfactif d'une infinie richesse par rapport à nous et aux singes.

La perception des mouvements est une autre affaire. Un chat qui joue avec un pauvre mulot le laisse tranquille tant qu'il ne bouge pas. Dès qu'il s'agite, le supplice reprend. Un loup fait confiance à son odorat et débusquera une proie immobile. Encore plus étonnant : donnons des criquets à un gros lézard affamé. Tout criquet qui saute est attrapé par la langue aussi longue que vélocité du lézard. En revanche, si un criquet reste immobile devant lui, alors il ne court aucun risque. Dans les savanes africaines, les très jeunes antilopes, comme les faons de nos biches, restent tapis dans les herbes. Ils bougent très peu et émettent des odeurs discrètes. Les prédateurs passent à côté, mais si un babouin ou un chimpanzé passe par là et qu'il le voit, l'antilope se fait croquer. La longue évolution proie/prédateur est passée à côté du comportement prédateur de certains singes qui chassent à vue, et le plus souvent de façon opportuniste.

La perception du réel par les singes, la nôtre, est riche de couleurs et de reliefs. Essayez d'imaginer la vision des perroquets qui se décline en tétrachromie. Voilà qui devient frustrant. Tournons-nous alors vers les chauves-souris qui nous étonnent avec leurs radars. Comment reconstruire leur réel ? Quant à la vision des taupes...

À l'écoute du monde

L'audition est bien développée chez les singes. On note cependant que la disposition du tympan varie d'une lignée à l'autre comme la présence d'un conduit auditif externe ou interne. C'est d'ailleurs une caractéristique des mammifères que d'avoir ce que l'on nomme une oreille moyenne avec une série osseuse de trois osselets – le *stapes*, l'étrier et le marteau – qui font la jonction entre le tympan et l'oreille interne. Dans un passé fort lointain, ces os formaient la partie postérieure de la mandibule chez nos ancêtres reptiliens. Pour eux, l'écoute du monde se faisait par les vibrations venant du sol et transmises via la mandibule. Inutile de passer du Mozart à votre lézard ou à votre crocodile, à moins de lui coller, non pas l'oreille, mais la mâchoire

inférieure sur l'enceinte. On aura plus succès chez les oiseaux, virtuoses du chant et du sifflement. On découvre depuis peu que, chez les étourneaux par exemple, on détecte des dialectes, des phrasés différents qui varient selon les individus, les clans et les colonies. Que se disent-ils ?

Le cas des cétacés est plus frustrant. Les chants des baleines comme les modulations des dauphins échappent à notre compréhension, d'autant qu'ils se diffusent sur des distances hors de portée des voix les plus fortes de tous les animaux terrestres. Ce réel du milieu aquatique qui autorise la communication sur des kilomètres à la ronde dépasse notre entendement. À cela s'ajoute le sonar ou écholocation qui permet aux dauphins de repérer congénères, ennemis et proies, mais malheureusement pas les filets dérivants des pêcheurs qui leur ont piqué l'idée du sonar.

L'homme se posant toujours en étalon du réel, il se trouve bien en peine de percevoir les ultrasons comme les infrasons, fréquences définies d'après son spectre auditif. Sur ce terrain, l'avantage du chien agace plus d'un maître, à moins que celui-ci n'en use pour le rappeler. Du côté des infrasons, on aimerait pouvoir lancer un appel fort et lointain vers les femelles désirées comme le font les éléphants. Ils émettent des sons de basse fréquence qui se diffusent sur des kilomètres. Bien des amants désireux aimeraient se faire entendre ainsi.

Cette dernière remarque vise à stigmatiser notre difficulté à comprendre comment les animaux perçoivent le réel. Certes, on peut toujours l'imaginer en essayant d'éviter l'euphorie naïve de l'anthropomorphisme comme le réductionnisme affligeant de l'animal machine. Pour revenir à ce qui compte dans tous ces réels, tout cela se ramène à des histoires de bouffe et de sexe ! Ce qui change, ce sont les formes qu'on y met.

Avant d'aborder la perception du réel au travers de la chimie, il reste à aborder un sens quelque peu délaissé, le toucher. Nous autres les singes avons les extrémités des doigts très sensibles à la chaleur, aux rugosités, aux pressions. Les bouts de nos doigts sont bourrés de cel-

lules capables de nous livrer de nombreuses sensations. Cela est d'une grande utilité pour l'épouillage, le précurseur du langage chez l'homme. Voilà un sens bien négligé et que les aveugles développent d'une manière peu concevable par les autres hommes. Ceux qui possèdent un chat ont pu apprécier la satisfaction que tire le cher animal à faire ses griffes, surtout sur le fauteuil en cuir. Les tigres font de même sur les troncs d'arbres. On n'imagine pas que ce sens puisse avoir de l'importance chez les animaux dont les membres se terminent par des sabots. Certes, mais quand on connaît la mécanique sophistiquée du pied du cheval, ce dernier nous paraît fascinant avec son système de pompe qui permet au sang de remonter dans les membres. Tout jeune cavalier apprend vite à bien nettoyer le pied d'un cheval car « pas de pied, pas de cheval ». Le cavalier engagé sur un terrain dangereux ou égaré dans la nuit sait qu'il peut faire confiance à son cheval. Il ne s'agit pas du sens du toucher comme chez les singes et l'homme. Chez ce dernier, inutile de préciser l'importance du toucher dans les relations amoureuses. Toujours du côté des relations chaudes, on constate que si les animaux à sang chaud – homéothermes – comme les mammifères et les oiseaux ont de bonnes bases de thermodynamique, certains de leurs prédateurs à température du corps variable – lézards, serpents – usent d'infra-rouges pour les repérer. Curieux réels en chaud-froid.

Le réel du côté de la chimie

Rien de mieux pour apprécier le réel des animaux qu'un bon étron de carnivore. Pour nous les hommes, mettre le pied dedans nous livre une très mauvaise impression d'un réel nauséabond, même du pied gauche. Pour les mouches, c'est une source succulente de nourriture. Quant aux autres chiens, voilà un message riche d'informations sur l'identité du dépositaire de l'étron, sur ses humeurs ou ses dispositions sexuelles.

Le sens de l'odorat est le plus primitif de tous nos sens et, de ce fait, le plus subtil. Cependant notre évolution nous a spolié sur ce plan. Nous avons évoqué notre sens de la vision très développé associé à des yeux

situés juste de part et d'autre de la racine du nez. Toutefois, la convergence des globes oculaires eut pour effet de rétrécir l'espace de la partie moyenne de la face réservée aux fosses nasales. Notre sens de l'odorat est bien rétréci depuis plus de 30 millions d'années. Nous sommes les seuls mammifères dépourvus de truffe. D'ailleurs, la classification des primates se fait au « pif » à partir de l'anatomie du bout du nez. On n'a cependant pas tout perdu, comme en témoignent les « nez » des grands parfumeurs et les œnologues, mais cela demande beaucoup de talent et d'apprentissage.

Pour les hommes, les odeurs évoquent des réels multiples, mais nous laissent plutôt indécis quant aux choses du sexe. Chez tous les animaux, les femelles produisent des phéromones qui stimulent les ardeurs des mâles. Les singes semblent apparemment inconscients de ce type d'incitateur chimique produit par les femelles. Cela semble être le cas pour l'espèce humaine. Néanmoins, quelques études récentes indiquent que les femmes émettent des messages chimiques autour de leur période d'ovulation auxquels les hommes seraient sensibles, bien que cela ne soit pas perçu de manière consciente, et donc pas perceptible dans notre réel conscient.

Nous avons quelques difficultés à imaginer le réel d'un chien qui possède un nez des milliers de fois plus sensible que le nôtre. On s'étonne aussi de voir un mâle se languir à cause des phéromones d'une femelle en chaleur, et encore plus lorsqu'il prête plus d'attention aux urines déposées par une chienne que par la chienne elle-même si ses chaleurs s'estompent. Que dire des papillons mâles capables de détecter quelques rares molécules de phéromones à des kilomètres à la ronde ? Mais peut-on parler de réel à propos de l'odorat, même si les phéromones interviennent comme autres messagers que sexuels chez des insectes comme les fourmis ? Entre l'animal-machine bourré de tous les sens et l'animal qui tente de reconstruire un réel et de le penser, la nature déploie toutes les subtilités de la physique et de la chimie. L'homme démiurge découvre les lois fondamentales de la nature, plus il devrait s'émerveiller de leurs réalités au sein du monde vivant. Hélas !

Conclusion

Poser la question du réel des animaux n'est pas aussi banal qu'il y paraît. Nous vivons dans un réel macroscopique, autrement dit conçu à l'échelle de l'homme. Dans ce réel dominant les lois de la physique classique avec la prépondérance des forces de gravitation et la tyrannie du temps linéaire, la longue flèche du temps. Les insectes n'échappent pas à ces lois, bien évidemment, mais le poids y est moins pesant et le temps, si bref, ne compte pas. Leur *microcosmos* n'a évidemment rien à voir avec le microcosme du Moyen Âge qui ramenait l'Univers à l'échelle de l'homme. En ce temps-là, quand la Terre était au centre de l'Univers, ce dernier se pensait au travers de l'homme, seule conscience de la Nature. Le seul réel est celui de l'homme, ceux des animaux étant forcément incomplets et non pas autres. En dehors de cela, point de monde concevable. On accepte, sans bien le ressentir, d'autres réels aussi étranges qu'inconnus pour les insectes. Alors pourquoi refuser ces autres réels aux animaux plus proches de nous, comme les vertébrés ? Ils ont aussi leurs représentations du monde et nous commençons seulement à en prendre conscience car nous finissons par accepter de nous dépouiller de notre anthropocentrisme viscéral.

J'aurais pu proposer une contribution qui énumère les caractéristiques physiques des organes des sens des animaux, leurs diverses performances ou les modélisations de plus en plus complexes des physiologistes, des biomécaniciens ou autres biologistes de talent. Au lieu de cela, il m'a semblé plus pertinent, sinon plus amusant, de soulever quelques questions fondamentales, celle des origines de la conscience n'est pas la moindre, visitées à l'aide de quelques grandeurs simples de la physique. Il ne s'agit aucunement de sombrer dans un triste réductionnisme, mais tout simplement de dire que les grandeurs de la physique – et surtout la physique qui sait représenter d'autres mondes qui échappent à nos sens immédiats – s'avèrent de bons vecteurs pour aborder des questions fondamentales qui touchent à la vie et à l'homme.

CONCLUSION

Émile Noël : Il paraît normal que la physique s'intéresse au réel. C'est même sans doute sa vocation essentielle que d'en définir les aspects. Il semble bien pourtant que cette fin désirée lui échappe encore. Est-il raisonnable de penser qu'elle puisse y atteindre un jour ?

Gilles Cohen-Tannoudji : Cette quête du réel est bien évidemment omniprésente dans les recherches en physique (comme d'ailleurs dans toute recherche scientifique) ; elle est en filigrane de tous les thèmes abordés dans les rencontres « Physique et interrogations fondamentales ». La deuxième rencontre y faisait explicitement référence dans son intitulé : « virtualité et réalité ». Toutefois, quoi d'étonnant à ce que cette quête soit sans fin ? Il me semble au contraire que le terme le plus adapté au fait que cette fin désirée échappe toujours est celui d'*horizon*. Ferdinand Gonseth, le philosophe suisse que j'évoquais à la fin de *Causalité & finalité*, associe dans une même expression les concepts de réel et d'horizon, lorsqu'il affirme au terme d'un développement concernant les rapports entre l'expérience, l'intuition et la théorie, dans son ouvrage majeur, *La géométrie et le problème de l'espace*¹ : « Rien ne

1. – Ferdinand Gonseth, *La géométrie et le problème de l'espace*, Neuchâtel, Éditions du Griffon, 1949, pp. IV-46 (310).

nous autorise à penser que notre connaissance, même à ses dernières frontières, soit davantage qu'un *horizon de connaissance* ; que les dernières « réalités » que nous ayons conçues, soient davantage qu'un *horizon de réalité*. » Dominique Lambert, le mathématicien philosophe, qui a participé et contribué à deux de nos rencontres « Physique et interrogations fondamentales », (« prédictions et probabilité » et « symétrie et brisure de symétrie ») explique ce que l'on a appelé la « déraisonnable efficacité des mathématiques » en physique, par sa thèse que les mathématiques, constituant une sorte de prolongement de la perception visuelle, visent ce qu'il appelle un *réel-horizon*. Et puisque nous avons évoqué les théories de cordes, je ne résisterai pas au plaisir de citer cette strophe de Verhaeren² :

Le blanc cordier visionnaire
Du fond du soir et du mystère
Attire à lui les horizons

É. N. : Plusieurs intervenants qui ont volontiers traité de leur vision du réel ont omis parfois la notion de ses dimensions éventuelles. De fait, que veut-on dire exactement quand on parle de dimensions à son propos ? Dans l'état actuel des connaissances, peut-on trancher et dire qu'il a 1, 2, n , $n + 1$, une infinité, ou 0 dimensions ?

G.C-T : Effectivement certaines interventions ont davantage parlé du réel que de ses dimensions. Lorsque nous avons choisi le thème, notre idée était d'avoir une rencontre qui serait un pendant de la première qui avait été consacrée au *temps et sa flèche* et qui s'intéresserait plutôt à l'espace, d'où la référence aux dimensions. Cela étant posé, nous savons d'une part que nos rencontres sont tout sauf exhaustives, et d'autre part, que toutes les disciplines n'abordent pas nécessairement de la même façon une même question ou interrogation. En fait, je pense que les fameuses interrogations fondamentales auxquelles nous nous

2. – Citée par Michel Collot dans *La poésie Moderne et la structure d'horizon*, Paris, PUF, collection « Ecriture », 1989, p. 47.

intéressons forment un véritable réseau, et qu'elles sont toutes connectées les unes aux autres. Si l'on prend, par exemple, la contribution de Philippe Coiffet, on peut dire qu'elle aurait eu autant sa place lors de la rencontre sur *virtualité et réalité* que lors de celle sur *le réel et ses dimensions*. Cependant, Gilles-Gaston Granger nous explique, dans *Le probable, le possible et le virtuel*³, qu'en tant que s'opposant, non pas au réel mais à l'actuel, le virtuel peut être considéré comme une dimension du réel. S'il est vrai que des physiciens qui sont intervenus ont bien centré leur propos sur le concept de dimension, ils sont bien loin d'en avoir épuisé toute la richesse : il y aurait des pages et des pages à écrire, par exemple sur la « régularisation dimensionnelle » ou la « transmutation dimensionnelle. » J'espère en tous cas que la lecture du présent ouvrage apportera au moins un début de réponse à la question que vous posez sur ce que l'on veut dire exactement quand on parle de dimension à propos du réel.

É. N. : A-t-on déjà une idée des thèmes qui seront traités dans les prochaines rencontres « Physique et interrogations fondamentales » ?

G. C.-T. : Il est probable que notre prochaine rencontre sera fortement marquée par l'année internationale de la physique qui, en 2005, marquera le centenaire des travaux révolutionnaires d'Albert Einstein qui ont ouvert la voie à pratiquement tous les développements de la physique contemporaine. Avec mes collègues du comité d'organisation des rencontres⁴, nous avons commencé à réfléchir à ces futurs thèmes, parmi lesquels la notion d'*horizon* a beaucoup retenu notre attention.

3. – Gilles-Gaston Granger, *Le probable, le possible et le virtuel*, Paris, Éditions Odile Jacob, 1995

4. – Alain de Bellefon, Isabelle Cossin, Marie-Emmanuelle Couprie, Michel Crozon, Geneviève Edelheit, Jean-François Glicenstein, Claudine Hermabessière, Jean-Pierre J. Lafon, Valérie Lefèvre-Seguín, François Nida, Joël Pollet, Yves Sacquin, Jean-Marc Terrasse.

Achevé d'imprimer sur les presses de l'Imprimerie BARNEOUD
B.P. 44 - 53960 BONCHAMP-LÈS-LAVAL
Dépôt légal : Novembre 2003 - N° d'imprimeur : 14520
Imprimé en France

Huitième rencontre « Physique et interrogations fondamentales »

Organisée par la Société française de Physique
et la Bibliothèque nationale de France

Le réel et ses dimensions

La science étudie un système en évaluant ses grandeurs caractéristiques : elle définit ses dimensions. Combien de dimensions caractérisent le réel ? Quelles dimensions sont les plus pertinentes ? La physique classique étudie trois dimensions de l'espace et une de temps. Ces quatre dimensions sont réunies par la relativité restreinte et générale. Les théories cosmologiques les plus modernes en font intervenir de nouvelles, presque imperceptibles à l'homme.

En mathématiques, le nombre de dimensions caractérisant un système peut être non entier. En biologie, on peut s'interroger sur la dimension du système fondamental à étudier : la cellule, l'organe, l'individu ? Comment la taille d'un organisme influe-t-elle sur son appréhension du réel ? Enfin, en art pictural, comment représente-t-on les formes, la profondeur ?

De nouvelles questions fondamentales, une nouvelle approche pluridisciplinaire vous sont ici proposées.

Textes de participants prestigieux : Françoise Balibar, Jean-Philippe Uzan, Pierre Binétruy, Pierre Sonigo, Yves Pomeau, Philippe Coiffet, Pascal Picq.

Ces colloques ont pour but de confronter les approches d'un même thème par différentes disciplines scientifiques, en lui apportant un éclairage historique, philosophique ou esthétique.



9 782868 836939

ISBN : 2-86883-693-3

www.edpsciences.org

