

Zeitschrift: Revue de Théologie et de Philosophie
Herausgeber: Revue de Théologie et de Philosophie
Band: 40 (1990)
Heft: 1

Artikel: Le physicien et ses principes
Autor: Rivier, Dominique
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-381398>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 13.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

LE PHYSICIEN ET SES PRINCIPES*

DOMINIQUE RIVIER

Résumé

Ayant précisé la distinction qu'il convient de faire en physique, entre les principes, les lois et les conditions aux limites, l'article analyse les changements de contenu et de forme subis ce dernier siècle par les principes du physicien en vue de fonder théories et modèles (principes d'invariance, principes cosmologiques). A la fois trame et nervures de ces modèles, les principes soulignent et soutiennent les frontières du savoir du physicien, d'où leur mobilité parfois surprenante.

à la mémoire de
Jean Franel et Ernst Carl Gerlach Stueckelberg

1. Préambule: les interrogations d'Henri Poincaré

Henri Poincaré, l'un des derniers grands mathématiciens, avec Hermann Weyl, à avoir marqué d'une empreinte profonde les représentations qu'aujourd'hui nous nous faisons de la nature, portait à l'aube de ce siècle un jugement sans complaisance sur l'avenir de la physique mathématique.

Après avoir rappelé comment les expériences les plus récentes paraissent battre en brèche les uns après les autres les principes les mieux établis de la physique — thermodynamique comprise —, l'auteur de la *Valeur de la Science* continuait ainsi: «Ces principes sur lesquels nous avons tout bâti vont-ils s'écrouler à leur tour?». «Au milieu de tant de ruines, que reste-t-il debout?»... «En présence de cette débâcle générale des principes, quelle attitude va prendre la Physique Mathématique?»¹

Est-ce le géomètre avide de rigueur qui, chez Poincaré, conduit à un pessimisme aussi radical? Ou bien ce pessimisme ne fait-il que traduire la réalité selon laquelle les principes de la physique sont irrémédiablement condamnés à terme, livrés qu'ils sont au ver rongeur de l'expérience?

* Texte, revu et annoté, de la leçon d'adieu prononcée le 25 novembre 1988 à l'Université de Lausanne

¹ Henri POINCARÉ: *La Valeur de la Science*, Flammarion, Paris, 1905, p. 180 et 200.

Telle est la question fondamentale que suggéraient il y a près d'un siècle les interrogations de Poincaré. Tel est aussi le thème général de cette leçon, dont la substance se répartit sous les quatre titres suivants :

- la structure des modèles propres au physicien
- la montée des invariances dans les principes de la physique contemporaine
- les principes de la cosmologie, conçue comme la physique de l'univers
- le modèle cosmologique type et le principe anthropique

Quelques remarques sur la valeur et le rôle des principes en physique mettront un terme à cet exposé.

2. *La structure des modèles propres au physicien*

Isaac Newton n'a pas seulement énoncé les lois qui ont immortalisé son nom. Dans un des monuments les plus majestueux et les plus beaux de l'esprit humain, les *Principia mathematica philosophiae naturalis*, il a fixé pour plus de trois siècles les linéaments du modèle dont le physicien va se servir pour décrire la nature.

Tournant résolument le dos aux anges de Kepler² comme aux tourbillons de Descartes³, Newton distingue pour la première fois les trois éléments constitutifs du modèle physique, à savoir *les principes, les lois et les conditions initiales*⁴.

- Les principes sont des propositions à la fois simples et générales, applicables au plus vaste domaine possible de la nature.

par exemple : les trois «lois de Newton» qu'il vaudrait mieux appeler les trois «principes de Newton», terme rendant mieux le texte original qui porte «Axiomata sive leges motus».

- *les lois sont des propositions particulières, applicables à une certaine partie bien délimitée de la nature, ou système physique.*

par exemple : la loi du mouvement de la Lune autour de la Terre.

² Johann KEPLER : *Opera Omnia*, Ch. Frisch ed., Heyder et Zimmer, Francfort 1858, vol. 6, *Epitome Astronomiae Copernicanae*, p. 339 s.

³ René DESCARTES : *Principia Philosophiae*, Amstaelodami, 1644. Traduction française, Paris 1647. Troisième partie *Du monde visible*, dont André Bridoux écrit qu'elle est «encombrée d'hypothèses et de figurations aujourd'hui tout à fait périmées»... DESCARTES, *Œuvres et lettres*, Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard, Paris, 1953, p. 552.

⁴ Isaac NEWTON : *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, editio ultima, Amstaelodami, MDCCXIV. Newton se distance de ses prédécesseurs par la méthode qu'il résume au début du troisième livre des PRINCIPES, dans les «regulae philosophandi» dont voici la première : «Causas rerum naturalium non plures admitti debere, quam quae et verae sint et earum phaenomenis explicandis sufficient» (p. 357).

- *les conditions initiales, ou conditions aux limites*, sont les données qu'il faut ajouter aux lois pour déterminer l'état ou le mouvement d'un système.

par exemple: la position et la vitesse de la Lune le 25 novembre 1988, à 17 h 30, heure de l'Europe centrale.

C'est pour avoir manqué à faire la distinction entre ces éléments fondamentaux que les précurseurs de Newton ont peiné dans leurs tentatives d'expliquer la chute des graves ou le mouvement des planètes.

Aussi paradoxal que cela puisse paraître, le physicien jouit d'une certaine latitude dans le choix des principes et la forme qu'il leur donne. C'est ainsi que dans le bilan qu'il dressait de la situation de la physique mathématique à la fin du siècle dernier, — au moment même où Planck et Einstein allaient entrer en scène — Henri Poincaré dénombrait six principes, qu'il énonçait dans l'ordre et les termes suivants⁵:

- le principe de conservation de l'énergie, ou principe de *Mayer*;
- le principe de la dégradation de l'énergie, ou principe de *Carnot*;
- le principe de l'égalité de l'action et de la réaction, ou principe de *Newton*;
- le principe de relativité, d'après lequel les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes, soit pour un observateur fixe, soit pour un observateur entraîné dans un mouvement de translation uniforme; (...)
- le principe de la conservation de la masse, ou principe de *Lavoisier*;
- le principe de moindre action.

L'on constate que, des trois *leges motus* de Newton, Poincaré ne retient que la troisième. La première — le principe d'inertie — est remplacée par le principe de relativité, sous une forme qui trahit la préoccupation majeure des physiciens au tournant du XIX^e siècle, à savoir comment expliquer l'impossibilité de mettre en évidence quelque mouvement que ce soit par rapport à l'éther. Quant à la *lex secunda* de Newton — la force est égale à la dérivée par rapport au temps de la quantité de mouvement —, elle fait place au *principe de moindre action*. Un bref rappel concernant l'histoire de ce principe n'est pas sans intérêt pour la suite.

En 1662, Fermat⁶ était parvenu à déduire les lois de Descartes qui régissent la réflexion et la réfraction de la lumière en invoquant un *principe d'économie*. C'est «le principe si commun et si établi que la Nature agit toujours par les voies les plus courtes».

⁵ Henri POINCARÉ: *La Valeur de la Science*, p. 176.

⁶ Pierre DE FERMAT: Lettre à M. de la Chambre, *Analysis ad refractiones* du 1^{er} janvier 1662 in: Jules TANNERY et Charley HENRY, *Œuvres de Fermat*, Gauthier-Villars, Paris 1896, vol. I, p. 170.

Près d'un siècle plus tard, Maupertuis⁷, l'aimable président de l'Académie des Sciences de Berlin, se propose de «corriger» le principe de Fermat qu'il ne comprend pas, puis de l'élargir au chemin d'une particule. Avec beaucoup de foi et d'imprécision, quelque audace aussi, il parvient à montrer qu'une particule choisit toujours la trajectoire qui rend minimale son *action*, nom qu'il donne au produit de la *masse* par la *vitesse* et par le *chemin*. Pour justifier ce résultat surprenant, Maupertuis invoque les causes finales: «On ne peut douter que toutes choses ne soient réglées par un Etre Suprême qui, pendant qu'il a imprimé à la matière des forces qui dénotent sa puissance, l'a destinée à exécuter des effets qui marque sa sagesse (...). Une Mécanique aveugle et nécessaire suit les desseins de l'Intelligence la plus éclairée et la plus libre (...)». Un tel galimatias ne manque pas d'exciter la verve de Voltaire, qui l'immortalise dans *La Diatribe du docteur Akakia, médecin du Pape*⁸.

Mais Euler⁹ est là qui veille. Reprenant au fond le travail de Maupertuis, substituant non sans élégance la rigueur à l'arbitraire, le mathématicien bâlois donne ses lettres de noblesse au principe de moindre action.

Celui-ci, brillamment généralisé par Lagrange¹⁰, va permettre à William Hamilton¹¹ de réussir l'éclatante synthèse des principes de la *mécanique* et de l'*optique géométrique*.

Ainsi s'ouvre toute grande la voie qui, un siècle plus tard, mènera aux découvertes capitales de la mécanique ondulatoire, puis de la mécanique quantique.

3. *La montée des invariances dans les principes de la physique contemporaine*

En élargissant à toute la physique le *principe de relativité du mouvement de translation rectiligne et uniforme*, puis en amalgamant ce principe avec celui de la *constance absolue de la vitesse de la lumière dans le vide*, posée comme

⁷ C'est dans un premier mémoire traitant de la lumière, intitulé «*Accord de différentes lois de la Nature*» et lu devant l'Académie Royale des sciences de Paris le 15 avril 1744, que Maupertuis définit pour la première fois ce qu'il entend par «la quantité d'action». Il reprend cette définition dans un second mémoire, traitant des chocs de deux corps, intitulé «*Recherche des lois du mouvement*» et lu devant l'Académie royale des Sciences de Berlin en 1746. MAUPERTUIS (Pierre Louis Moreau de): *Œuvres*. Nouvelle édition corrigée et augmentée, Lyon, Jean-Marie Bouyset, 1756, p. 3 à 42. Le paradoxe de la «réussite» de Maupertuis tient en ceci: partant d'une hypothèse fausse (la lumière va plus vite dans la matière que dans le vide), il aboutit à une conclusion correcte (la loi de la réfraction de la lumière).

⁸ VOLTAIRE: *Œuvres complètes*, tome vingt-septième, Plancher, Paris 1818, p. 139-163.

⁹ L. EULER: *Dissertation sur le principe de moindre action, avec l'examen des objections de M. le Prof. Koenig faites contre ce principe*, Berlin, 1753.

¹⁰ J. L. DE LAGRANGE: *Mécanique analytique*, tome I, Paris, 1853, p. 228.

¹¹ William HAMILTON: *The mathematical papers of Sir... Vol. I, Geometrical Optics* (1931); Vol. II, *Dynamics* (1940), Cambridge University Press.

vitesse maximale de propagation de l'énergie, Albert Einstein¹² a profondément modifié les conceptions de l'espace et du temps héritées de Newton.

«Nam tempus, spatium, locum et motum, ut omnibus notissima, non definio»¹³. A l'instar d'Aristote, Newton n'a pas donné de définition de l'espace et du temps et depuis lors, comme le faisait remarquer un homme d'esprit, on n'en a pas trouvé de meilleure¹⁴.

Toutefois, le caractère *absolu* conféré à ces concepts par l'auteur des *Principia* implique une structure bien définie pour l'espace-temps, par quoi il faut entendre, *sub specie aeternitatis*, l'ensemble de tous les événements passés, présents et futurs, ici et ailleurs. Pour repérer un événement donné E^0 , il faut un référentiel, c'est-à-dire un triède trirectangle d'axes de coordonnées (pour déterminer le lieu x de l'événement E dans l'espace), et un *chronomètre*

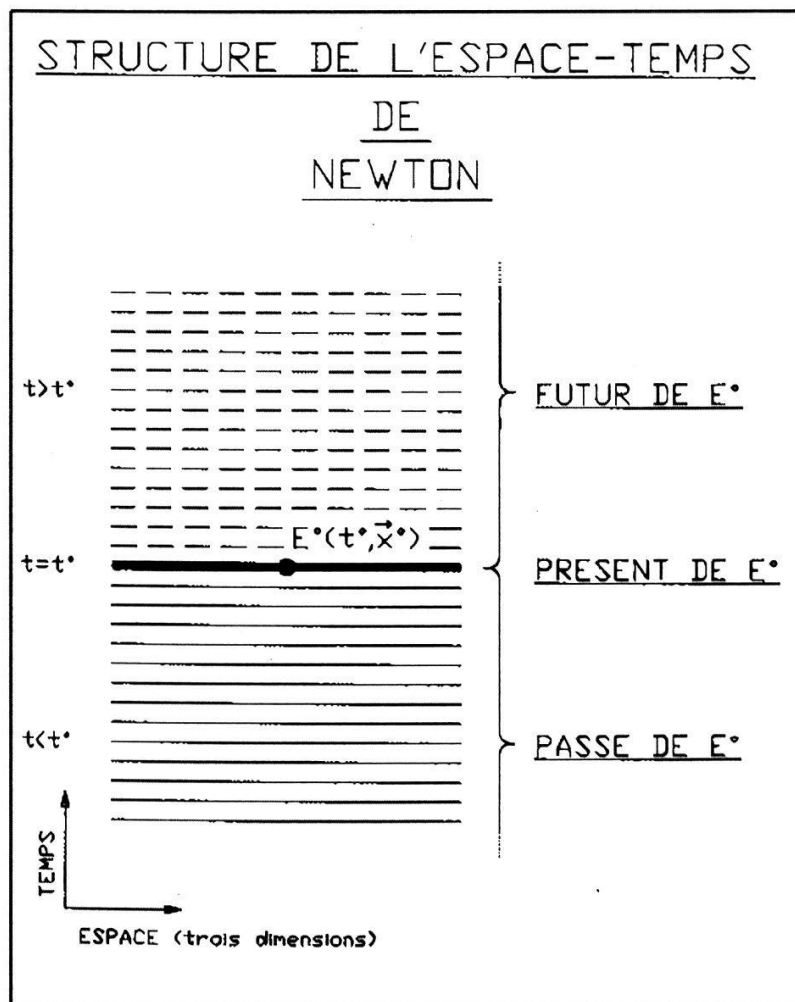


Fig.1

¹² Albert EINSTEIN: *The Meaning of Relativity*, Princeton University Press, Princeton, 1922, chapitres I et II.

¹³ I. NEWTON: *Principia*... (voir note 4) Definitiones, scholium, p. 5.

¹⁴ Fernand BRUNNER: «La notion d'espace depuis les origines grecques jusqu'au XVIII^e siècle», *Studia philosophica*, Vol. XXIV, 1964, V. für Recht und Gesellschaft, Basel.

enregistreur, pour fixer la date (ou l'instant) t de ce même événement. Précision importante: le référentiel doit être *inertiel*, c'est-à-dire que le principe d'inertie y est applicable.

Dans la vision newtonienne, un événement quelconque E^0 (t^0 , x^0) définit trois régions distinctes dans l'espace-temps à quatre dimensions dont deux seulement sont représentées sur la figure 1 :

- le présent de E^0 est fait de tous les événements E (t^0 , x) simultanés de E^0 (c'est-à-dire caractérisés par le même temps t^0) ; il est représenté par un hyperplan illimité à trois dimensions [une dimension sur la figure] : c'est tout l'espace au temps t^0 .
- le passé de E^0 est fait de tous les événements antérieurs à E^0 [c'est-à-dire caractérisés par un temps t plus petit que t^0] : il est représenté par un hyperspace à quatre dimensions [deux dimensions sur la figure] limité vers le futur par l'hyperplan du présent $t = t^0$
- le futur de E^0 est fait de tous les événements postérieurs à E^0 [c'est-à-dire tels que t plus grand que t^0] ; il est représenté par un hyperspace à quatre dimensions [deux dimensions sur la figure] limité vers le passé par le même hyperplan du présent $t = t^0$.

Dans cette vision du monde dans son éternité, la suite des événements occupés par un objet quelconque dans l'espace est représentée par une ligne continue dans l'espace-temps : la ligne d'univers. L'espace-temps apparaît lui-même comme un gigantesque « mille-feuilles », dont chaque couche (supposée infiniment mince) correspond à notre espace imaginé à un instant donné.

Le principe de la constance absolue de la vitesse de la lumière dans le vide (vitesse maximale de propagation de l'énergie) remplace cette structure en « mille-feuilles » par une autre que l'on peut appeler structure en diabol.

Dans la vision einsteinienne en effet¹⁵, un événement quelconque E^0 (t^0 , x^0) ne définit pas moins de six régions ou domaines dans l'espace-temps, représentés sur la figure 2 :

- le présent-ici de E^0 , c'est-à-dire l'événement E^0 lui-même auquel correspond le pont E^0 .
- le passé matériel de E^0 est fait de tous les événements d'où une particule (quantum de matière) aurait pu atteindre l'événement E^0 : il lui correspond l'intérieur du demi-cône comprenant la partie passée de la ligne d'univers d'un objet coïncidant avec E^0 : c'est le demi-cône passé de E^0 .
- le passé lumineux de E^0 , fait de tous les événements d'où un photon (quantum de lumière) aurait pu atteindre l'événement E^0 : il lui correspond la surface du demi-cône passé.
- le futur matériel de E^0 est fait de tous les événements qu'une particule (quantum de matière) pourrait atteindre de E^0 : il lui correspond l'intérieur de l'autre demi-cône de sommet E^0 , celui qui comprendra la partie à venir

¹⁵ Albert EINSTEIN, voir note 12.

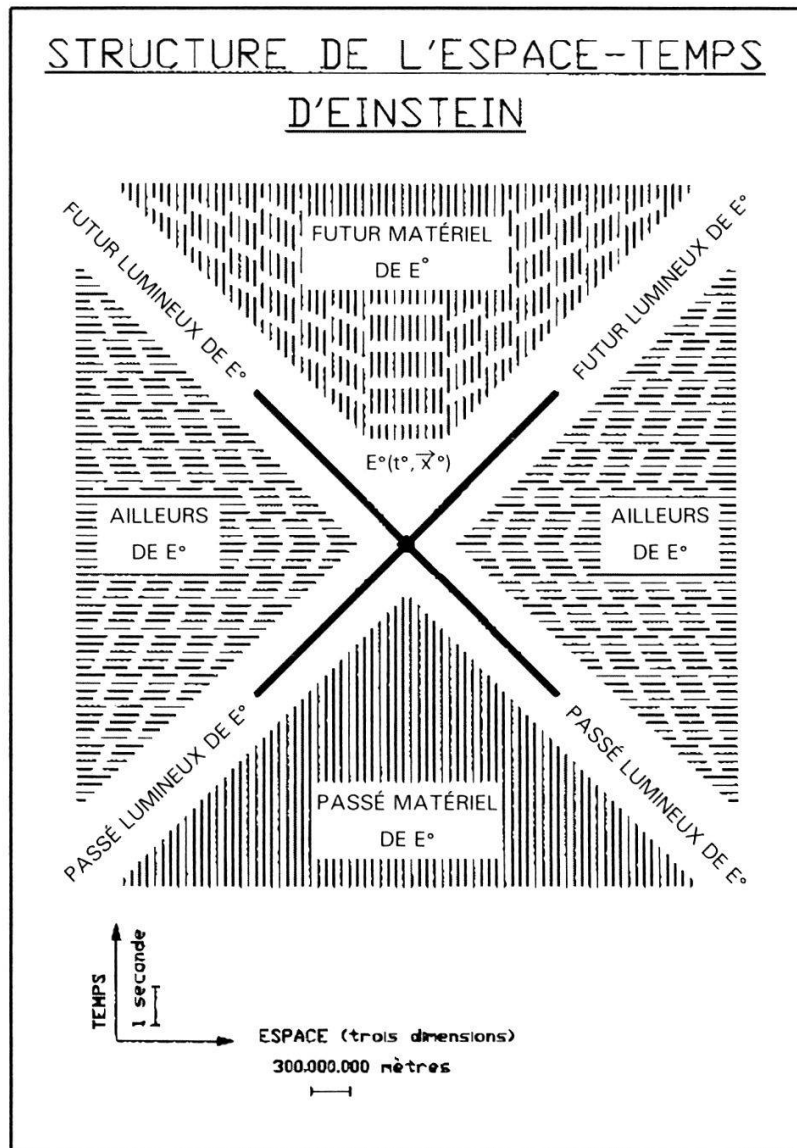


Fig. 2

de la ligne d'univers de l'objet coïncidant avec E^0 : c'est le demi-cône futur de E^0 .

- le futur lumineux de E^0 est fait de tous les événements qu'un photon pourrait atteindre de E^0 : il lui correspond la surface du demi-cône futur de E^0 .
- enfin l'ailleurs de E^0 est fait de l'ensemble des événements d'où il est impossible d'envoyer un quantum de matière ou de lumière qui atteindrait E^0 ou aussi de l'ensemble des événements qu'il est impossible d'atteindre d'un quantum de matière ou de lumière issu de E^0 .

Ainsi, d'un événement E situé dans l'ailleurs de E^0 , je ne puis dire s'il a lieu avant ou après l'événement E^0 . Cela dépend du référentiel inertiel choisi pour repérer les événements E^0 et E .

La représentation *sub specie aeternitatis* donnée ici de l'espace-temps doit être utilisée avec un certain discernement. Le physicien ne peut, à l'instar du

botaniste qui herborise dans son jardin, aller et venir à sa fantaisie dans l'espace-temps.

C'est ainsi qu'un observateur ne connaît jamais que la partie passée de sa ligne d'univers. Au moment où cet observateur coïncide avec l'événement E^0 , les seuls autres événements de l'univers dont il peut savoir quelque chose — notamment ceux qui constituent la ligne d'univers de cet observateur — *se trouvent tous à l'intérieur ou à la surface du demi-cône du passé de E^0 .* Tout le reste de l'Univers lui est — fondamentalement — inconnu.,

C'est dire que si, des régions les plus reculées de l'Univers, un cataclysme devait fondre sur le système solaire pour nous anéantir d'ici quelques années ou quelques millions d'années, nous n'en pourrions rien savoir tant que ce cataclysme se trouve à l'extérieur du cône de notre passé. Maigre consolation : au fur et à mesure que nous traçons notre ligne d'univers, ce cône du passé s'étend — un peu à la manière de notre mémoire —, ce qui à l'évidence, peut réserver des surprises !

Voilà qui ruine définitivement le mythe de l'intelligence supérieure inventé par le marquis de Laplace à la fin du XVIII^e siècle, mythe qui par la suite a fasciné tant de bons esprits : « Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux »¹⁶.

Dans la vision einsteinienne ou relativiste en effet, si vaste, si puissante, si supérieure que soit cette intelligence, elle ne pourrait jamais, de l'événement où elle se trouve, connaître — au sens physique du terme — davantage de l'Univers *que les événements situés à la surface et à l'intérieur du demi-cône de son passé.* Ce qui ne suffit pas à déterminer son avenir.

Mais revenons à l'événement E^0 et à l'espace-temps qui l'entoure. Si l'antériorité ou la postériorité (par rapport à E^0) d'un événement E situé dans *l'ailleurs* de E^0 *dépend du choix du référentiel*, il n'en va pas de même *des six domaines* mis en évidence par le principe de relativité d'Einstein. De même que la valeur de la vitesse de la lumière, *ceux-ci sont indépendants de ce choix.* On dit que ces domaines sont *invariants par rapport à tout changement de référentiel inertiel.*

C'est précisément l'un des insignes mérites d'Einstein¹⁷ que d'avoir attiré l'attention des physiciens sur l'importance du concept *d'invariance.* Celui-ci

¹⁶ Pierre SIMON, MARQUIS DE LAPLACE, *Théories analytiques des probabilités*, in *Œuvres*, tome VII, Imprimerie Royale, Paris, 1847. Introduction p. VI.

¹⁷ Cf. référence de la note 12, p. 9, 32, 38 particulièrement. Voir aussi Eugène P. WIGNER *The Role and Value of the Symmetry Principles and Einstein's Contribution to their Recognition*, in *Symmetries in Science*, Plenum Press, New York and London, 1980, p. 13-22.

permet de donner une forme et une interprétation particulièrement simples à bon nombre des principes de la physique.

Prenons un exemple: c'est une observation bien banale que les lois des phénomènes sont les mêmes, hier, aujourd'hui et demain. Si cela n'était pas, la physique et les sciences de la nature n'existeraient pas, les physiciens pourraient rendre leur tablier et la plupart des hommes de science avec eux. Eh bien, cette permanence des lois de la physique constitue un cas particulier d'invariance: *l'invariance relative à une translation dans le temps du référentiel inertiel*.

Imaginons maintenant qu'un système physique puisse être suffisamment isolé du reste du monde: alors à cette invariance particulière correspond *le principe de conservation de l'énergie de ce système*. On voit ainsi que la conservation de l'énergie d'un système isolé est un aspect d'une *propriété importante de l'espace-temps* de la relativité restreinte: il n'y a pas de point privilégié pour mesurer le temps. Comme aiment à dire les physiciens, *le temps est homogène*.

Plus généralement, grâce à la notion d'invariance, il est possible d'établir une correspondance stricte entre les *propriétés de l'espace-temps* et certains des *principes de conservation* pour un système isolé. Ces correspondances sont résumées dans le tableau suivant (figure 3, p. suivante).

Mais les correspondances mentionnées dans ce tableau ne sont que les cas particuliers d'une correspondance plus générale encore fondée sur les propriétés d'invariance d'une quantité caractéristique de chaque système physique, *l'action généralisée*, celle-là même dont l'archétype figure dans le principe de moindre action inventé par Maupertuis.

C'est ainsi qu'une conjecture audacieuse, née il y a deux siècles d'analogies théologiques et métaphysiques plutôt fumeuses, débouche aujourd'hui sur l'un des théorèmes les plus profonds de la physique mathématique contemporaine; et aussi d'une grande portée. Voyez plutôt:

Pour décrire ses systèmes — qu'il s'agisse de tout l'univers ou seulement de l'une de ses particules élémentaires —, le physicien doit considérer toutes sortes de transformations, plus générales, encore que des changements de référentiel. A chacune des *invariances* liées à tel groupe de ces transformations générales, le théorème de Cartan-Noether¹⁸ fait correspondre *son principe de conservation*. L'exemple le plus simple est *la conservation de la charge électrique*, conséquence de l'invariance liée aux transformations dites de jauge des potentiels électromagnétiques associés aux équations de Maxwell.

De là à conclure que *la plupart, sinon tous les principes de la physique devraient pouvoir se mettre sous la forme de principes de conservation*, c'est-

¹⁸ Elie CARTAN: *Leçons sur les invariants intégraux*, Hermann, Paris, 1922, Ch. I et IX. Emmy NOETHER, Nachr. Kgl. Ges. Wiss. Goettingen, 1918, p. 235.

CORRESPONDANCES ENTRE PROPRIÉTÉS DE L'ESPACE-TEMPS ET PRINCIPES DE CONSERVATION POUR UN SYSTÈME ISOLÉ		
PROPRIÉTÉ DE L'ESPACE-TEMPS	TRANSFORMATION RESPECTANT L'INVARIANCE	GRANDEUR JOUISSANT DU PRINCIPE DE CONSERVATION DANS UN SYSTÈME ISOLÉ
HOMOGÉNÉITÉ DU TEMPS (PAS D'ORIGINE DES TEMPS)	TRANSLATION DANS LE TEMPS	ÉNERGIE
HOMOGÉNÉITÉ DE L'ESPACE (PAS D'ORIGINE DANS L'ESPACE)	TRANSLATION DANS L'ESPACE	QUANTITÉ DE MOUVEMENT (DE TRANSLATION)
ISOTROPIE DE L'ESPACE (PAS DE DIRECTION PRIVILÉGIÉE DANS L'ESPACE)	ROTATION AUTOUR D'UN AXE DE L'ESPACE	MOMENT CINÉTIQUE (QUANTITÉ DE MOUVEMENT DE ROTATION)
ISOTROPIE DE L'ESPACE-TEMPS (PAS DE RÉFÉRENTIEL A VITESSE PRIVILÉGIÉE)	SAUT DE VITESSE (D'UN RÉFÉRENTIEL A UN AUTRE)	QUANTITÉ DE MOUVEMENT DU CENTRE DE MASSE DU SYSTÈME

Fig. 3

à-dire être rattachés à une propriété d'invariance relative à un groupe de transformations, il y a un pas que d'aucuns se refusent à franchir aujourd'hui.

Il reste cependant que la question vaut la peine d'être posée. Notamment si l'on considère la tentative, engagée il y a bientôt un siècle, de donner une forme satisfaisante *au principe* qui doit fonder sans ambiguïté ni paralogisme *la physique quantique*. Combien de formes n'a-t-on pas déjà proposées: principe d'incertitude de Heisenberg, principe de correspondance de Bohr, principe de complémentarité de Bohr, principe d'invariance adiabatique d'Ehrenfest, principe d'exclusion de Pauli, principe de superposition des états, principe d'action de Dirac, principe des sommes sur les lignes d'univers de Feynmann¹⁹? Cette multiplicité des principes sur lesquels on a tenté et l'on tente encore de construire la physique quantique n'est-elle pas le signe d'un embarras fondamental — trahi par d'acrobatiques et périlleux accommodements avec

¹⁹ Max JAMMER: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw Hill, London, 1966, Clarendon Press, Oxford, 1947, p. 532. FEYNNMAN and HIBBS: *Quantum Mechanics and Path Integrals*, McGraw Hills, London, 1964.

la rigueur mathématique —, embarras fondamental que ne saurait masquer complètement l'extraordinaire pouvoir de prédiction d'une théorie que personne à ce jour, n'est parvenu à prendre en défaut?

4. *Les principes de la cosmologie contemporaine, physique de l'Univers*

Ce sont les astronomes qui, par l'observation attentive et minutieuse du mouvement des astres, ont donné à la mécanique naissante son premier champ de réflexion et d'application. Et c'est par l'explication du mouvement de la Lune et des planètes que la théorie de la gravitation de Newton a fini par s'imposer. Si, comme celle de Vénus, l'atmosphère terrestre se trouvait en permanence encombrée de nuages opaques²⁰, la physique telle que nous la connaissons aujourd'hui n'existerait probablement pas. Cela dit, les physiciens ont à ce jour réglé leur dette, car ce sont eux qui, en définitive, ont gratifié l'astronomie de ces nouvelles sciences du ciel que sont l'astrophysique, la radioastronomie et surtout la cosmologie²¹, considérée comme la physique de l'Univers pris dans son tout. Et pour qui veut suivre le physicien et le voir imaginer puis manier ses principes, la cosmologie offre un champ particulièrement digne d'intérêt.

Dans la vision du monde que nous impose le principe de la relativité d'Einstein — nous l'avons expliqué —, seuls nous sont accessibles les événements situés à l'intérieur et sur la surface du demi-cône de notre passé.

Cette limitation est d'autant plus contraignante que les télescopes nous révèlent un Univers en mouvement, et quel mouvement! Semblable à celui des restes d'une gigantesque explosion dont les débris — des amas de galaxies de quelque 10^{20} kilomètres de diamètre (10 000 années lumière) — s'éloignent de nous et de notre amas local avec des vitesses qui croissent proportionnel-

²⁰ Cf. Henri POINCARÉ: *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1906. La plus grande partie du chapitre VII est consacrée à l'analyse des conséquences de cette hypothèse pour la géométrie.

²¹ Jusqu'au début du XX^e siècle, l'Univers des astronomes est *stationnaire*: la cosmologie se réduit à la *cosmogonie*, c'est-à-dire à une *théorie de la formation du système solaire*, à quoi se limite alors l'Univers. Kant, Laplace et Jeans ont proposé les cosmogonies parmi les plus célèbres. Au sens de *l'étude de la structure de l'espace-temps considéré dans son tout*, la cosmologie est fille de la théorie de la relativité générale d'Einstein. Avant même la découverte du phénomène de la récession des galaxies par Hubble en 1929, Alexander Friedmann avait, en 1922 déjà, déduit à partir des équations d'Einstein un modèle général pour l'espace-temps en expansion. Consulter à ce sujet: Emmanuel KANT: *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels oder Versuch von der Verfassung und dem mechanischen Ursprunge — des ganzen Weltgebäudes nach Newtonischen Grundsätzen abgehandelt*, Königsberg und Leipzig, bei Johann Friedrich Petersen, 1755. Alexander FRIEDMANN, *Z.f. Physik* 10, 377-386 (1922). James JEANS: *Astronomy and Cosmology*, Cambridge University Press, Ch. XVI, 1929. Edward P. HUBBLE, *Proc. Nat. Acad. Sc., USA* 15, 169 (1929). P. SIMON DE LAPLACE, *Exposition du système du monde 1796*, in *Œuvres Complètes*, Paris, Gauthier Villars, 1884, Tome VI, p. 498-509 (1884).

lement aux distances qui nous séparent de ces amas et qui finissent par atteindre la vitesse de la lumière. Si l'on tient compte encore de ce fait qu'au-delà du système solaire, la quasi-totalité des informations reçues de l'Univers nous est apportée sur la gamme des ondes électromagnétiques se déplaçant à la vitesse de la lumière, ce que nous percevons du cosmos n'a pratiquement rien à voir avec ce que le langage courant désigne par «instantané».

Tâchons de saisir ce point capital en partant d'une analogie; considérez la ville de Lausanne telle qu'elle apparaît à un observateur perché sur la flèche de la Cathédrale et braquant une lunette en direction du lac. Mais, pour un instant, imaginons qu'au lieu des 300 000 kilomètres par seconde, la valeur de la vitesse de la lumière soit *d'un mètre par an seulement*. Que verrait notre observateur au bout de sa lunette? Autour de l'Eglise de St-François, des lansquenets bernois montant la garde. A la hauteur du coteau sur lequel s'édifiera la gare CFF, des vilains labourant ferme les vignes du Comte de Savoie. Plus loin dans les vallons de Cour, il reconnaîtrait des *missi dominici* de Charlemagne hâtant le pas vers l'Italie. Plus loin encore, des Alémanes et des Burgondes aux prises sur les hauts d'Ouchy. Enfin dans le port et jusqu'au village de Vidy, des légionnaires romains en balade. Sans oublier, au large, des lacustres se trempant les pieds dans les eaux bleues du Léman. Reconstruire à partir de ce kaléidoscope diachronique l'image de la ville de Lausanne telle que nous la connaissons aujourd'hui, telle est, *mutatis mutandis*, le genre de tour de force que doit réaliser le cosmologue qui voudrait absolument se faire une image de notre Univers «maintenant». Et s'il devait pour cela s'en tenir strictement à l'information recueillie dans les télescopes — et d'autres détecteurs de signaux venus des espaces interstellaires —, notre cosmologue se trouverait devant une tâche impossible. Force lui est donc de faire appel à l'imagination, à l'intuition et à la raison. Et c'est là précisément qu'interviennent *les principes de la cosmologie*. Le plus important porte le nom de *principe cosmologique*. En voici le libellé: «A une échelle des longueurs et du temps suffisamment grande, l'univers est homogène et isotrope». Plus précisément, cela signifie qu'à cette échelle, il n'y a *ni lieu privilégié, ni direction privilégiée* dans l'Univers²².

Ce principe constitue la base la plus large et la moins contestée de la cosmologie contemporaine. On peut y voir une extension de la vision copernicienne du monde, selon laquelle l'homme, considérant le ciel, doit se garder de penser qu'il occupe sur la Terre une position privilégiée. Pour Copernic, on le sait, ce n'était pas à la Terre mais plutôt au Soleil que devrait revenir la place au centre de l'Univers²³. Selon le principe cosmologique, ce n'est plus seulement la Terre, mais encore le système solaire, la Voie lactée et l'amas de

²² Cf. H. BONDI: *Cosmology* Oxford, 1964, p. 11-18 et M. A. H. MACCALLUM: *Anisotropic and inhomogeneous relativistic Cosmology*, 533-580 in S. HAWKING and W. ISRAEL, ed, *General Relativity*, Cambridge University Press, 1979.

²³ N. COPERNICUS: *De revolutionibus orbium coelestium*, Lib. I, cp. 10.

galaxies auquel nous appartenons qui occupent dans le cosmos des positions banales et insignifiantes. De centre, il n'y en a plus!

Imaginons deux observateurs jetés au hasard dans l'Univers; ces deux observateurs verraient des objets très différents dans leur proche voisinage; cependant, au fur et à mesure qu'ils porteraient plus loin leur regard ou leurs télescopes, ce qu'ils verraient différerait de moins en moins, et à l'échelle cosmique²⁴, les deux images deviendraient indiscernables. Tel est le contenu du principe cosmologique.

Aucune observation sérieuse n'est venue, à ce jour, l'infirmier. Au contraire. Aussi bien l'homogénéité (à très grande échelle) de la distribution de la matière dans l'espace, les décalages des raies du spectre de la lumière émise par les galaxies lointaines²⁵ que l'isotropie du rayonnement de fond sur les ondes centimétriques²⁶ semblent confirmer le principe cosmologique.

Il est un second principe sur lequel s'appuie indirectement toute la cosmologie contemporaine, par l'intermédiaire de la théorie de la gravitation d'Einstein.

A l'échelle de l'Univers, on le sait, ce sont les forces de gravitation qui jouent le rôle-clé pour assurer la cohésion relative des objets célestes ou des systèmes d'objets célestes²⁷: pas de cosmologie physique sans, au préalable, une théorie de la gravitation. Et pas n'importe laquelle: pour être reçue, la théorie doit intégrer au moins localement et approximativement la structure relativiste de l'espace-temps rappelée tout à l'heure. Or, à ce jour, la seule théorie qui remplit cette condition est la relativité générale d'Einstein. Pour construire cette théorie — un monument dont la beauté évoque les *Principia* de Newton —, Einstein s'est fondé sur un principe dont il est lui-même l'auteur: *le principe d'équivalence*. Il a raconté comment lui en est venu l'idée, idée qu'il appelle «der glücklichste Gedanke meines Lebens»:

²⁴ On entend par «échelle cosmique» une échelle dont l'unité de longueur est de l'ordre de 300 millions d'années-lumière, ce qui correspond environ au cinquantième des distances maximales observées dans l'Univers de l'ordre de 10^{26} m, cf. G. DE VAUCOULEURS and G. BOLLINGER, *Astrophysical Journal*, 233, 433. (1979).

²⁵ C'est le décalage (par rapport aux raies correspondantes émises par une source au repos sur la Terre) qui sert à déterminer la vitesse de récession des galaxies. Cf. R. H. DICKE and P. J. E. PEEBLES: *The Big Bang Cosmology* in S. HAWKING and W. ISRAEL, *General Relativity*, voir note 22.

²⁶ C'est le rayonnement électromagnétique — prévu en 1948 par G. Gamow et découvert en 1965 par Penzias et Wilson — dont l'origine remonte au moment où matière et rayonnement électromagnétique se sont séparés, l'Univers devenant alors transparent à ce rayonnement. L'âge de l'Univers était alors de 300 000 ans environ, cf. H. ANDRILLAT *La cosmologie relativiste* dans H. ANDRILLAT et alii, *La Cosmologie moderne*, Masson, Paris 1986.

²⁷ Des quatre types de forces, seules entrent en ligne de compte les deux forces à longue portée, la force électromagnétique et la force gravitique. Pour les distances astronomiques, la force électromagnétique est éliminée parce que la charge électrique totale des objets «célestes» (c'est-à-dire planètes, étoiles, galaxies, etc.) est d'effet négligeable.

«J'étais assis devant mon bureau de l'Office fédéral des Brevets à Berne», écrit Einstein, «lorsqu'une idée traversa mon esprit: si une personne vient à tomber du toit d'une maison, elle ne sent plus son poids.» «En effet», poursuit Einstein, «si cette personne laisse elle-même tomber quelque objet celui-ci tombera à la même vitesse qu'elle (bien sûr tout cela en faisant abstraction de la résistance de l'air)»²⁸.

Issu de l'interprétation géniale d'une observation déjà faite par Newton — selon laquelle en un point donné de l'espace où la résistance de l'air est négligeable, tous les corps tombent avec la même accélération —, le principe d'équivalence peut s'énoncer ainsi: *A l'origine d'un référentiel en chute libre et sans rotation par rapport aux étoiles fixes, les lois de la physique sont indépendantes du lieu et du moment de cette origine, ainsi que de la vitesse du référentiel*²⁹.

Cela revient à dire que la structure en diabolos de l'espace-temps de la relativité restreinte est encore applicable dans le voisinage de tout événement de l'espace-temps, mais qu'en passant de cet événement à un autre, l'orientation locale du cône passé-futur peut changer de façon continue sous l'effet de la matière ou d'autres formes d'énergie. C'est dans ce sens que la matière — et plus généralement l'énergie — «courbent l'espace-temps».

Là encore, notons-le, il faut le sérieux coup de pouce de l'imagination et de l'intuition pour oser élargir à *tout l'espace-temps* des observations qui, de fait, ne concernent qu'une minuscule partie de celui-ci.

5. Le modèle cosmologique type et le principe anthropique

En combinant les exigences du principe cosmologique et des lois issues de la théorie de la gravitation d'Einstein, d'une part, avec les conditions initiales et les conditions aux limites tirées des observations astronomiques et astrophysiques, d'autre part³⁰, il est possible de construire pour notre Univers — considéré comme un système physique — un type de modèle³¹ d'une grande cohérence et, somme toute, d'une grande simplicité. En voici l'essentiel: il existe un *temps cosmique* utilisable dans tout l'Univers. Ce temps cosmique a un commencement qui coïncide avec l'existence — il y a de cela 15 à 20 milliards d'années — d'un *Univers primordial*, singularité quasi ponctuelle et cataclysmique dont les propriétés physiques passent l'imagination la plus

²⁸ J. ISHIWARA: *Einstein Koen-Roku*, Tookyū-Tosho, Tokyo, 1977, cité dans A. PAIS: *Subtle is the Lord*, Clarendon Press, Oxford, 1982, p. 179.

²⁹ Il existe plusieurs versions du principe d'équivalence. cf. C. M. WILL, *The Confrontation between Gravitation Theory and Experiment* in HAWKING and ELLIS, ref. 19, p. 24-89.

³⁰ H. P. ROBERTSON, *Astrophysical Journal* 82, 284 (1936) 83, 187, 257 (1957) A. G. WALKER, *Proc. Lond. Math. Soc.* (2) 42, 90 (1936).

³¹ Ce modèle type est appelé parfois *modèle standard*, cf. H. ANDRILLAT, réf. (26), p. 109 à 121.

débridée: une température de 10^{32} degrés et une masse spécifique de 10^{97} kg par mètre cube. Plus important est le fait qu'à partir de ce commencement cataclysmique, le *modèle* suit une évolution que semble maîtriser le physicien. Voyons cela:

Du magma primordial naissent, dans l'ordre et le désordre, des particules hyperlourdes, des quarks et des leptons, des protons et des électrons, des neutrinos, des photons et des gravitons; puis des noyaux légers, de l'hydrogène et de l'hélium gazeux, enfin des nébuleuses, des étoiles et des galaxies — véritables usines à noyaux lourds — dont les restes nous entourent et qui constituent l'Univers tel que nous le voyons aujourd'hui. Parmi ces restes se trouve notamment le rayonnement de fond sur les ondes centimétriques, vestige isotrope de l'éclair cosmique qui, 300 000 ans après le cataclysme initial, se mit à dévaler l'Univers lorsque la lumière fut séparée de la matière³².

Se pose maintenant une question qui ne manque pas d'intérêt:

Comment le physicien peut-il accepter l'image qu'il est amené à se donner d'un Univers évoluant de façon irréversible à partir d'une origine singulière et relativement proche — si l'on songe que l'âge de la Terre est estimé à quelque 5 milliards d'années?

Face à l'Univers primordial, à la fois singulier et situé dans un proche passé, les physiciens semblent se diviser en deux partis au moins.

Les premiers admettent l'existence d'une singularité *absolue* d'un commencement au-delà duquel se situe l'inconnaissable sans s'effaroucher trop des concordances que l'on peut discerner entre cette singularité sans précédent et la création du monde tiré du néant par Dieu, telle que la révèle le livre de la Genèse³³.

Les seconds, au contraire, redoutent qu'on puisse les soupçonner de faire appel, ne fût-ce qu'inconsciemment, à «la main de Dieu». Ils veulent éviter une situation qu'ils qualifient «d'inquiétante»³⁴.

Pour se tirer d'affaire, ils partent d'une idée avancée naguère par Pascual Jordan, et dont on dit qu'elle bouleversa Einstein³⁵. Cette idée, c'est que, tout bien considéré, *l'énergie totale de l'Univers pourrait être nulle*. En effet: pourquoi l'énergie liée à la masse, comptée positivement, ne serait-elle pas exactement compensée par l'énergie liée à l'attraction gravifique, comptée négativement? Et dans ces conditions, pourquoi l'Univers primordial ne serait-il

³² Cf. note 26.

³³ R. H. DICKE and J. E. PEEBLES: *The Big Bang Cosmology-Enigmas and Nostrums*, in. S. HAWKING and W. ISRAEL: *General Relativity, an Einstein Centenary Survey*, chapitre 11.

³⁴ Cf. Ilya PRIGOGINE et Isabelle Stengers: *Entre le Temps et l'Eternité*, Fayard, Paris 1988, chapitre VII.

³⁵ E. P. TRYON: *Nature*, vol. 246, p. 396 (1973) et G. GAMOW: *My world line: an informal Autobiography*, New York, Viking Press, 1970.

pas le résultat d'une gigantesque fluctuation cosmique *du vide*? La physique quantique enseigne en effet que *le vide de l'espace-temps* n'est pas le néant, mais tout au contraire un milieu actif, comme en permanente et générale ébullition. Il s'agit de bulles d'énergie en nombre indéfini, paires de particule-antiparticule *virtuelles*, dont la durée de vie est inversement proportionnelle à l'énergie, conséquence des relations de corrélation de Heisenberg. Qu'une de ces fluctuations déclenche un processus catastrophique «déchirant le tissu de l'espace-temps», et voilà créée la singularité primordiale.

Ces physiciens de la «singularité gratuite», comme on les appelle parfois, n'éprouvent-ils vraiment aucune gêne à prendre à leur compte l'idée — si chère aux philosophes atomistes de l'Antiquité — selon laquelle le monde (dont ils se plaisent par ailleurs à démontrer la superbe ordonnance) aurait été engendré dans les jeux mystérieux que le hasard fait jouer au vide et aux atomes?

Reste un dernier point. Si ingénieux, si cohérent, si puissant que soit le modèle aujourd'hui choisi pour décrire l'Univers, il présente une bien curieuse particularité. De quoi s'agit-il? Rappelons d'abord qu'il existe dans la nature un certain nombre de *constantes universelles*, comme la *vitesse de la lumière* (c), la *constante de la gravitation* (G), la *constante de Planck* (h), la *charge de l'électron* (e) et les *masses des particules subatomiques*. Jusqu'à ce jour, nous avons tout lieu de penser que ces grandeurs ne varient pas au cours des âges; d'où la désignation de *constantes naturelles*. Or, une étude détaillée du modèle cosmologique fait apparaître ceci: toutes choses restant égales d'ailleurs, de petites modifications apportées à la valeur numérique des trois constantes universelles (c), (h) et (e) provoqueraient de grands changements dans la structure des atomes et des noyaux atomiques: certains de ces derniers deviendraient instables ou même pourraient ne plus exister du tout.

Plus généralement, de petites modifications apportées aux *valeurs des constantes* (G), (h), (e) et (c), ainsi qu'aux masses des particules subatomiques, entraîneraient de formidables bouleversements dans la structure et surtout l'évolution des étoiles. Simplifiés à l'extrême, ces bouleversements tiennent dans l'alternative suivante: ou bien les étoiles rayonneraient trop d'énergie pour exister suffisamment longtemps, ou bien elles n'en rayonneraient pas assez pour être visibles, ce qui dans les deux cas rendrait *impossible* l'apparition de la vie! Ainsi, dans notre modèle cosmologique, tout semble se passer comme si l'Univers était le résultat d'un réglage *extraordinairement délicat et fragile* de la valeur des constantes universelles³⁶.

Quelle interprétation donner à cette situation inattendue? Le hasard, encore le hasard, toujours le hasard? Un bon nombre de physiciens n'acceptent pas ce refrain. Ils vont jusqu'à penser qu'elle nous oblige de renverser notre manière traditionnelle de considérer la nature. Ce sont les tenants du

³⁶ Cf. P. C. W. DAVIES: *The Accidental Universe*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982, chapitres, 3 et 4.

principe anthropique, le dernier-né des principes de la cosmologie. Selon ce principe, l'Univers doit être ainsi fait que la cosmologie y soit possible, puis-que la cosmologie existe. Or la cosmologie est le fait d'une espèce vivante ayant atteint un certain niveau de développement, ce qui suppose l'existence et l'évolution d'une certaine sorte de vie, d'un certain type de planète, puis, par voie de conséquence, l'existence d'un certain genre d'étoile, et ainsi de suite. En définitive, c'est l'existence de l'homme — sans parler de son intelligence et de son esprit — qui impose des limites très strictes aux valeurs des constantes universelles³⁷.

A son tour simplifié à l'extrême, le principe anthropique peut se résumer ainsi: «Si l'Univers a les propriétés que nous lui connaissons, c'est parce que nous, les hommes, nous sommes ici et maintenant».

Point n'est besoin de souligner le caractère franchement *anti-copernicien* de ce principe, lequel, en revanche, n'est pas sans évoquer, dans un retournement inattendu, une formule célèbre de l'Antiquité:

«Πάντων χρημάτων μέτρον ἐστὶν ὁ ἄνθρωπος»

«l'homme est la mesure de toutes choses» disait déjà Protagoras il y a près de 2500 ans³⁸. Peu compatibles avec les vues d'un scientisme fort répandu de nos jours, le principe anthropique n'a pas reçu l'aval de tous les physiciens.

6. En guise de réponse aux interrogations de Poincaré

Il est temps de conclure. Nous venons de faire le tour de quelques-uns des plus marquants parmi les principes forgés et utilisés par le physicien. Souhaitons qu'en dépit de certains passages rocaillieux, cette promenade ait plu et qu'elle ait permis de donner une idée de la manière dont travaille le physicien lorsqu'il se propose de décrire une nature qui ne se laisse pas toujours faire.

Chemin faisant, nous avons découvert un certain nombre de faits et d'idées. En assez grand nombre, semble-t-il, pour tenter de répondre aux questions posées par Henri Poincaré. Qu'on me permette de grouper ces réponses dans les quatre *thèses* que voici:

1. Même s'ils semblent parfois éloigner de la nature qu'ils doivent servir à décrire, les principes jouent un rôle fondamental dans la construction des

³⁷ Il existe plusieurs énoncés du principe anthropique. Une liste détaillée est donnée dans l'introduction de l'ouvrage: John D. BARROW et Frank J. TIPLER: *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford, 1986 (deuxième édition 1988), p. 1 à 23.

³⁸ ELIAS: *In Aristotelis categorias commentarium*, versus 265 in *Commentaria in Aristotelem graeca* Vol XVIII Berolin F. Georgii Reimeri 1900.

modèles du physicien. Ils en constituent à la fois les nervures et la trame.

2. En dépit de ce rôle-clé, les principes utilisés par le physicien ne sont pas éternels. En cela semblables aux êtres que nous sommes, ils voient le jour, ils vivent, ils prennent de l'importance, ils souffrent et ils meurent! Mais pour eux, mort ne signifie pas nécessairement disparition dans le silence de l'oubli. Certains principes — pensons à ceux d'Archimède et de Pascal — peuvent encore durer sous la forme de lois ou théorèmes, déduits des principes qui sont venus les remplacer.
3. Il est une fonction essentielle que remplissent les principes: c'est celle de *souligner* et, tout à la fois, de *soutenir* les limites entre l'ignorance et le savoir que le physicien s'imagine tenir de la nature. De là vient ce fait, surprenant pour certains, que les principes changent parfois plus vite que les lois³⁹.
4. Dans la tâche périlleuse qui est la sienne de concevoir des principes, le physicien fait d'abord appel à l'imagination et à l'intuition. C'est dire qu'il ne saurait se priver de puiser profondément dans les trésors intérieurs de son univers culturel, mythique et religieux.

De là vient que, dans la contemplation de la nature, le physicien ne peut se dispenser de parcourir les perspectives de l'histoire, de visiter les palais de l'algèbre et de la géométrie, de s'asseoir aux banquets de la philosophie, de boire aux sources de la théologie, ou encore d'errer à l'aventure dans les jardins des lettres et des arts. Car c'est là qu'il trouve la liberté. C'est là aussi que, fuyant la solitude, il découvre de valeureux compagnons de voyage.

Et c'est enfin là qu'au trouble émerveillé de l'homme de science:

«Le silence éternel de ces espaces infinis m'effraie»⁴⁰

répond, débordant de joie, la foi du poète et du musicien:

«Brüder... überm Sternenzelt
Muss ein lieber Vater wohnen!»⁴¹

³⁹ Cette mobilité des principes de la physique contraste avec la fermeté des principes en logique, par exemple.

⁴⁰ B. PASCAL: *Pensées*, in *Œuvres complètes*, éditions de la Pléiade Gallimard, Paris 1954, p. 1113.

⁴¹ F. SCHILLER: *An die Freunde* v. 11-12. Ces deux vers sont cités à quatre reprises par le chœur dans la quatrième partie de la *Neuvième Symphonie* de BEETHOVEN: deux fois dans l'*Andante Maestoso* (mesures 611-626, 632-654), une fois dans l'*Allegro energico* (mesures 740-762) et une dernière fois dans le *Prestissimo* final (mesures 864-876)!