

Albert Einstein et la physique théorique¹

Yves De Rop



Albert Einstein à bord du paquebot l'emmenant aux Etats-Unis en 1931. (Album Einstein, textes et illustrations choisis par F. Balibar et J.-M. Lévy-Leblond, Seuil, 1989)

On l'a pour ainsi dire déifié. Cet homme si intimement impliqué dans les grands enjeux politiques et sociaux du XX^e siècle, le sionisme, le pacifisme, le nazisme, l'arme nucléaire, ce vieillard aux cheveux longs dont le portrait, tiré à des millions d'exemplaires, continue à faire les beaux jours des carteries et autres publicitaires, Albert Einstein (1879-1955) ne laisse

personne indifférent à l'originalité de son personnage. Mais ceci ne serait pas grand-chose si derrière cette facette haute en couleurs ne se dissimulait le génie. On peut dire que moins il comprenait Einstein, plus le grand public adulait ce physicien dont les théories audacieuses sur l'espace, le temps, la matière et l'Univers avaient bouleversé les conceptions les mieux ancrées jusque-là. Par-dessus tout, non seulement ces conclusions révolutionnaient la science, mais le plus spectaculaire était qu'elles apparaissaient comme pur produit de la pensée humaine, tant il est vrai que l'œuvre d'Einstein est d'abord celle d'un théoricien. Du fond de sa mansarde au 13 de la Wittelsbacherstrasse à Berlin, Einstein prédisait la courbure de l'espace-temps. Et l'observation cautionnait, ensuite, ses déductions mathématiques.

L'œuvre d'Einstein nous interpelle ainsi sous deux aspects au moins, complémentaires : l'un, plus strictement scientifique, l'autre, plus philosophique. Cet exposé voudrait se focaliser sur ces deux angles. La première partie traitera de l'élaboration de la théorie de la relativité restreinte, la seconde se concentrera sur quelques réflexions philosophiques concernant les caractéristiques de la science et de la physique théorique en particulier, son extraordinaire fécondité mais également ses limites.

I. La genèse de la théorie de la relativité

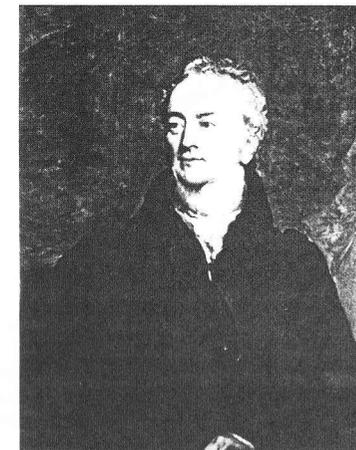
Lorsque, à la fin du XVII^e siècle, Newton établit la loi fondamentale de la mécanique reliant l'accélération d'un corps à sa masse et à la force qui s'exerce sur lui, il apparut que cette loi prenait une forme mathématique plus ou moins compliquée suivant les référentiels dans lesquels on l'écrivait. Notamment elle

s'avérait plus simple dans ceux où s'applique le principe d'inertie de Galilée et Descartes, selon lequel une fois lancé, un corps conserve indéfiniment son état de mouvement rectiligne et uniforme. C'est pourquoi on a qualifié ces référentiels (également appelés *repères* ou *systèmes*) d'*inertiels* ou encore de *galiléens*. Chose remarquable, ils sont tous en translation rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres : pour les connaître tous il suffit donc d'en détecter un. Un système d'axes passant par le centre du Soleil et muni d'horloges synchrones semble constituer un référentiel inertiel avec une bonne approximation.

D'un autre côté, on connaissait la loi mathématique reliant l'expression des coordonnées d'un événement relativement à deux référentiels inertiels différents : c'est la *transformation de Galilée*. En découle par exemple la *loi d'addition des vitesses* : si un mobile possède une vitesse v_1 par rapport à un certain référentiel inertiel se mouvant lui-même avec une vitesse v_2 par rapport à un deuxième référentiel inertiel, alors la vitesse du mobile mesurée dans ce dernier est égale à $v_1 + v_2$. Enfin, il apparut que *les lois de la mécanique sont covariantes pour la transformation de Galilée*, c'est-à-dire qu'elles ont la même forme dans tous les référentiels inertiels. C'est le *principe de relativité classique*.

Dans les systèmes non galiléens, nous l'avons dit, les lois de la mécanique s'expriment de façon plus compliquée. Pensons par exemple au référentiel du rotor en rotation par rapport au restant de la foire, dans le sens des aiguilles d'une montre pour fixer les idées : on doit y tenir compte de l'existence d'une *force centrifuge* qui justement plaque les « cosmonautes » contre la paroi et que ne ressentent pas les spectateurs immobiles par rapport à la foire. Imaginons maintenant d'une part le rotor fixe et d'autre part les spectateurs en rotation dans le sens contraire des aiguilles d'une montre : leur mouvement relatif est toujours le même, mais les « cosmonautes » ne sont évidemment plus écrasés contre les parois. Newton expliquait cette asymétrie en postulant l'existence d'un *espace absolu* permettant de discriminer les systèmes *vraiment* au repos et les autres, la force centrifuge se manifestant uniquement quand le rotor tourne par rapport

à l'espace absolu. Il s'agissait d'un argument d'existence *en droit* plutôt qu'*en fait*. L'espace absolu était en effet posé de façon ad hoc pour rendre compte d'une asymétrie que rien ne justifiait *physiquement*. S'il n'avait pas eu le mérite de donner un cadre scientifique à certaines aspirations philosophiques assez naturelles, on aurait même pu faire remarquer que son invocation relevait davantage du jeu de mots que d'une explication digne de ce nom.



Thomas Young (1773-1829)

Mais il y avait plus grave : l'équivalence de tous les systèmes d'inertie pour les lois de la mécanique s'accordait fort mal avec l'idée d'un espace absolu et suggérait même plutôt qu'il fût relatif. Pendant deux cents ans néanmoins la physique s'est accommodée de ces difficultés conceptuelles. Probablement l'immense succès pratique de la théorie de Newton a-t-il estompé la nécessité de leur traitement.

Au début du XIX^e siècle, il ressortit des travaux de Young et Fresnel que la lumière possède les caractéristiques d'un phénomène ondulatoire. On disposait depuis longtemps déjà d'une théorie de la propagation des ondes, décrite par l'*équation de d'Alembert*, et notamment des ondes acoustiques. Celles-ci sont des *perturbations matérielles longitudinales*, consistant en compressions et dilatations

¹ En écho à la conférence présentée à la tribune de la SAL le 29 novembre 1996

successives du milieu qu'elles traversent, qu'il soit gazeux, liquide ou solide. Ainsi, le son se déplace facilement dans un tuyau en fonte, dans l'eau ou dans l'air. Mais il apparut que la lumière est une onde *transversale*, très rapide de surcroît (sa vitesse c vaut environ 300 000 km/s), et aucune substance connue à l'époque ne semblait pouvoir constituer un support possible pour expliquer sa propagation.



Augustin Jean Fresnel (1788-1827)

On imagina donc un substrat, l'*éther*, doté de qualités paradoxales : assez rigide pour expliquer la vélocité de la lumière (de même qu'une vibration se meut plus rapidement dans une corde plus tendue), il devait d'autre part rester suffisamment subtil pour pénétrer tous les milieux où se propage la lumière et ne pas entraver les planètes dans leurs révolutions autour du Soleil.

Malgré ces difficultés, il se trouvait dans la seconde moitié du XIX^e siècle d'assez nombreux arguments pour légitimer l'hypothèse de l'existence de l'éther, en théorie tout au moins. C'est que dans l'esprit des physiciens, l'éther ne jouait pas seulement le rôle de milieu matériel pour la propagation de la lumière : il définissait également un système d'inertie privilégié. Voici pourquoi.



James Clerk Maxwell (1831-1879)

En 1864, Maxwell avait publié les équations fondamentales de l'électromagnétisme, les homologues, si l'on veut, de l'équation de Newton en mécanique, où il apparaissait que *les ondes lumineuses sont de nature électromagnétique*. D'autre part, les équations de Maxwell n'étaient pas covariantes pour la transformation de Galilée. Ceci n'avait rien de choquant dans le cadre d'une théorie de l'éther : on pensait en effet que les équations de Maxwell, régissant les ondes électromagnétiques, revêtaient une forme simplifiée dans le référentiel de l'éther, exactement comme l'équation de d'Alembert, régissant les ondes acoustiques, dans un repère immobile par rapport à l'air. Bien mieux, cette absence de neutralité des équations de Maxwell vis-à-vis des différents repères inertiels fit germer l'espoir selon lequel on allait enfin pouvoir matérialiser l'espace absolu : ce serait le référentiel au repos par rapport à l'éther.

Une conséquence optique généralement admise de l'hypothèse de l'éther était la suivante : *dans le référentiel de l'éther, la vitesse de la lumière est égale à c quel que soit le mouvement de la source*. Il s'agit là d'une

idée très naturelle, que l'on peut comprendre par une analogie acoustique : par rapport au talus d'une autoroute un jour sans vent, la vitesse du son émis par une voiture est toujours la même, que la voiture s'approche ou s'éloigne de l'observateur. Une *remarque due à de Sitter*, datant de 1913² donne un argument en faveur de cette conjecture pour la lumière. Considérons une étoile double gravitant dans un plan passant par la Terre et imaginons que l'éther n'existe pas. Au contraire, supposons valable une *théorie d'émission* selon laquelle la vitesse de la lumière par rapport à un repère inertielle donné est égale à sa vitesse par rapport à l'étoile émettrice, superposée à celle de l'étoile par rapport au repère. Dans ce cas, un astronome terrestre observera des rayons lumineux se propageant plus ou moins rapidement, selon qu'ils ont été émis au moment où l'étoile s'approche ou s'éloigne de la Terre. Compte tenu de l'éloignement des étoiles, la durée du trajet est donc sensiblement plus courte ou plus longue, respectivement. Par conséquent, le mouvement de l'étoile, observée depuis la Terre, semblera irrégulier, voire même discontinu par instants : subitement, d'autres images de l'étoile pourraient apparaître (ou disparaître) ailleurs sur sa trajectoire. Or, ces phénomènes n'ont jamais été constatés.

Deux effets importants étaient ainsi expliqués par une combinaison de la vitesse de la lumière avec celle de la Terre par rapport à l'éther : l'aberration en astronomie, découverte par Bradley en 1725, et l'effet Doppler-Fizeau.

Au cours du XIX^e siècle diverses expériences tentèrent de mettre en évidence les propriétés physiques de l'éther. Dès 1849, Fizeau s'était rendu célèbre en parvenant à mesurer la vitesse de la lumière par des méthodes physiques, sans avoir recours aux observations astronomiques comme c'était l'usage jusque-là. En 1851, il se demanda si l'éther était entraîné par les corps en mouvement. Pour répondre à cette question, il fit passer un faisceau lumineux dans des canalisations remplies d'un courant d'eau, de

vitesse égale à v par rapport au laboratoire. A l'aide d'un dispositif interférométrique il constata que la vitesse de la lumière par rapport au laboratoire était modifiée de 0,44 v . Il en déduisit que l'éther était partiellement entraîné par l'eau en mouvement, partiellement seulement puisque le coefficient d'entraînement est de 0,44 et pas 1.

Il est d'autre part un référentiel naturel qui, par sa vitesse, dépasse de loin les ordres de grandeur que pouvait atteindre Fizeau avec son courant d'eau (en l'occurrence, quelques mètres par seconde) : c'est la Terre elle-même, gravitant autour du Soleil à la vitesse de 30 km/s. De même que sur une autoroute par temps calme les passagers d'une voiture décapotable ressentent les effets d'un vent contraire, il doit souffler par rapport à notre planète un *vent d'éther*. Michelson (1881), puis Michelson et Morley (1887) se fixèrent l'objectif d'en déterminer la vitesse. Le verdict de leurs expériences fut révolutionnaire : *la vitesse mesurée était nulle*.

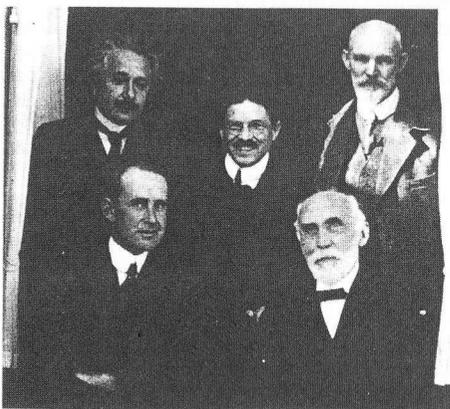
On pouvait certes interpréter ce résultat en postulant un *entraînement total de l'éther* par la Terre. Cette hypothèse semble néanmoins peu naturelle. A la rigueur, on accepterait encore d'admettre un entraînement complet de l'éther dans le sens du mouvement terrestre le long de l'écliptique, mais dans les autres directions ? En particulier, dans la direction du pôle de l'écliptique il fallait supposer que c'est l'atmosphère terrestre qui entraîne complètement l'éther, ce qui semble incompatible avec le résultat de Fizeau selon lequel l'eau, pourtant plus dense que l'air, n'entraîne l'éther que partiellement.

A vrai dire, l'expérience de Michelson-Morley n'excluait pas la possibilité de l'existence de l'éther, mais elle interdisait de lui attribuer le moindre mouvement. Psychologiquement, elle contribua donc à jeter un sentiment de discrédit sur l'espace absolu, dans la mesure où l'éther en représentait le dernier bastion. On en vint à soupçonner que *dans les faits aucune expérience de physique* (donc non seulement de *mécanique*, mais également d'*optique*, c'est-à-dire d'*électromagnétisme*)

² Donc postérieure à l'article original d'Einstein. Historiquement, l'intérêt de cette remarque fut d'argumenter non pas en faveur de l'éther, mais bien de l'une de ses conséquences, à savoir cette propriété d'invariance de c qu'avant Einstein on ne parvenait à justifier autrement.

ne permet de distinguer un référentiel inertiel d'un autre : si dans les faits tous les référentiels inertiels sont au repos par rapport à l'éther, ils méritent tous d'être considérés comme fixes par rapport à l'espace absolu. Cette dernière notion n'a donc guère de sens positif.

Diverses tentatives d'explication de ces contrariétés avaient bien été proposées, entre autres par Lorentz et Poincaré, mais toutes assez artificielles. Ainsi, à la fin du XIX^e siècle, hypothéqué de son statut de système d'inertie privilégié, empêtré dans des propriétés contradictoires qui soulevaient autant de difficultés qu'elles n'en levaient, l'éther n'offrait plus à la science que la triste figure désincarnée de *sujet du verbe onduler*.



Einstein, Eddington, Ehrenfest, Lorentz et De Sitter.

Les choses en étaient à peu près là lorsqu'Einstein entra en scène. On peut difficilement évaluer l'impact de l'expérience de Michelson-Morley sur sa pensée, car dans la suite lui-même s'est contredit à ce propos³. Ce sont en tout cas des considérations générales

d'élégance et de symétrie qu'il invoque prioritairement dans son mémoire fondateur de 1905, intitulé « *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* »^{4,5}. Quoi qu'il en soit, il érigea les inductions exposées ci-dessus en un principe général : *tous les référentiels inertiels sont au repos par rapport à l'éther, ils sont donc équivalents en ce qui concerne leurs propriétés physiques. C'est le principe de relativité*.

A ce stade cependant, il subsistait encore un choix quant à l'interprétation de ce principe : fallait-il penser que *dans n'importe quel référentiel inertiel, la vitesse de la lumière est égale à c quel que soit le mouvement de la source ou bien cela n'est-il vrai que dans le référentiel de l'émetteur seulement*? La première réponse l'oblige, comme nous l'avons dit, à stigmatiser la notion de mouvement de l'éther, mais aussi, ce qui est plus grave, à *sacrifier la transformation de Galilée au profit d'autres lois de transformation*. En effet, la loi classique d'addition des vitesses ne serait dans ce cas certainement plus correcte puisqu'elle se révélerait déjà fautive pour la lumière : un rayon lumineux possédant une vitesse égale à *c* par rapport à un train, se déplacerait toujours à la vitesse *c* par rapport au quai. La seconde réponse, qui trouverait un cadre naturel dans une théorie d'émission par exemple, condamne plus radicalement encore l'hypothèse de l'éther, qui implique l'indépendance du mouvement de la source émettrice sur la vitesse de la lumière.

« Je savais, » écrira Einstein à Ehrenfest le 20 juin 1912, « que le principe de la constance de la vitesse de la lumière était quelque chose d'indépendant du postulat de relativité et j'ai balancé pour savoir lequel était le plus vraisemblable, le principe de la constance de *c*

requis par les équations de Maxwell ou la constance de *c* uniquement pour un observateur situé sur la source de lumière. J'ai opté en faveur du premier. »⁶.

C'est le *second postulat de la théorie de la relativité restreinte*. Il apparaît comme une conséquence du principe de relativité si l'on interprète ce dernier comme un *principe d'invariance formelle des lois de la physique*, ce qui était tout à fait dans l'esprit d'Einstein⁷. La vitesse de la lumière *c* apparaît en effet comme coefficient dans les équations de Maxwell, et l'invariance en forme de celles-ci impose l'invariance en nombre de celle-là. Lu de cette manière, le principe de relativité constitue alors le *premier postulat de la théorie de la relativité restreinte*. Voici comment Einstein l'exprime dans l'article original cité ci-dessus :

« Dans tous les systèmes de coordonnées où les équations de la mécanique sont valables⁸, ce sont également les mêmes lois de l'optique et de l'électrodynamique qui sont valables ».

Et de conclure :

« L'introduction d'un « éther lumineux » se révélera superflue, dans la mesure où, dans la conception qui va être développée, il ne sera pas introduit d'« espace au repos absolu » doté de propriétés particulières ».

Comme le fait remarquer Jacques Merleau-Ponty, il faut insister encore une fois sur le fait que « *ce n'est pas tant la réalité des mouvements de l'éther qui fait problème que le sens ou le non-sens de l'expression* »⁹. Cette idée a été très tôt présente à l'esprit d'Einstein, comme en témoigne cet extrait d'une lettre à Mileva Maric datée probablement du 10 août 1899 :

« L'introduction du mot « éther » dans les théories de l'électricité a conduit à l'idée d'un milieu du mouvement duquel il est possible de parler, sans que l'on soit capable, à mon avis, d'associer une signification physique précise à ce que l'on dit. »¹⁰.

La relativité restreinte résout de façon élégante les paradoxes où s'enlisait la physique classique, en déduisant notamment du principe d'invariance de la vitesse de la lumière une nouvelle loi de composition des vitesses. Pilier de la physique moderne, elle en constitue une des branches les mieux vérifiées expérimentalement dans l'ensemble de ses conséquences. Elle fut complétée en 1915 par une théorie de la gravitation baptisée dans la suite *relativité générale* et centrée sur l'idée de *courbure de l'espace-temps*.



Einstein en 1933 au Coq-sur-Mer, en Belgique. (Album Einstein, textes et illustrations choisis par F. Balibar et J.-M. Lévy-Leblond, Seuil, 1989)

3 Albert Einstein, *œuvres choisies 2*, textes choisis et présentés par F. Balibar, O. Darrigol, B. Jech et J. Stachel, Seuil, 1993, p. 22, note 39.

4 Une traduction française annotée se trouve dans *Albert Einstein, œuvres choisies 2*, op. cit., p. 31.

5 Einstein critique ainsi l'asymétrie de l'électrodynamique de Lorentz, qui interprète l'interaction entre un aimant et un conducteur différemment selon que c'est l'aimant ou le conducteur qui se déplace absolument, alors que numériquement la valeur du courant induit dans le conducteur ne dépend que du mouvement relatif des deux corps.

6 Albert Einstein, *œuvres choisies 2*, op. cit., note 54 p. 24.

7 Contrairement à Lorentz et à Poincaré, qui admettaient une forme plus faible du principe de relativité.

8 C'est-à-dire les systèmes d'inertie.

9 J. Merleau-Ponty, *Einstein*, Flammarion, 1993, p. 163.

10 Albert Einstein, *œuvres choisies 2*, op. cit., p. 29 et note 7.

II. La physique et le sens du monde

Des milliers d'années avant l'ère chrétienne, les Egyptiens contemplaient déjà un firmament absolument identique à celui que nous observons aujourd'hui. Il y a quelque chose d'émouvant à réaliser que, par delà les changements drastiques qu'a connus la société depuis lors, par delà la vanité du champ de l'expérience humaine, si court dans l'espace et si bref dans le temps, les anciens utilisaient pour déterminer l'année nouvelle un spectacle accessible sans le moindre changement à nos yeux contemporains, à savoir le lever héliaque de l'étoile Soth (Sirius), suivant de quelques jours celui de la constellation d'Orion. Probablement l'immutabilité des cieux et la prédictibilité de ses mouvements ont-elles suggéré à l'être humain la possibilité de la science, qui de l'étude du ciel a progressivement élargi son réseau d'activités aux phénomènes terrestres. Toutefois, Aristote et ses successeurs médiévaux attribueront au monde lunaire et au monde sublunaire des propriétés physiques très différentes.



Aristote, dans *L'École d'Athènes* de Raphaël

Vint la révolution scientifique du XVII^e siècle. Galilée et Newton abolissent cette distinction et jettent les bases d'une nouvelle conception de la mécanique fondée sur la notion de *loi scientifique universelle*. Caractéristique essentielle de la science, la reproductibilité expérimentale (et donc la *prédictibilité*) engendra un déferlement mathématique qui tout naturellement triompha en physique, apparemment moins contingente que les sciences du vivant. Rapidement la fonction originelle de la science grecque, la fonction philosophique conduisant l'homme à se positionner dans un univers étrange, dut céder du terrain à une vision pratique, illustrée par de nombreuses applications techniques et par l'idée de progrès sur un univers étranger. Sa méthode : l'expérience; son contenu : les secrets d'une nature objective, écrits en langage mathématique; son but et sa justification : la connaissance opérationnelle du réel. Ce point de vue est largement diffusé dans l'enseignement actuel.

Adoptant une position extrême, certains philosophes ou scientifiques ont alors érigé en absolu la toute-puissance des lois de la nature. Si l'homme ne pouvait égaler les dieux, au moins le concept de loi scientifique lui permettait-il d'en comprendre la pensée. A défaut de dominer le vaste monde, au moins en possédait-il les clefs du vestibule. Ces lois furent parfois assimilées (Spinoza, Einstein), voire substituées (*les scientistes*) à un Dieu qui depuis bien des siècles occupait les devants de la scène¹¹. La tentation est assez naturelle, si l'on en juge par l'abondance des attributs communs (éternité, toute-puissance, organisation génératrice de *sens*). Notons que la cohabitation des lois avec un Dieu transcendant était pourtant admise par les pères fondateurs de la science rationnelle. Galilée avait refusé de faire interférer science et religion. Selon Descartes, les lois, en particulier celle de la conservation de la quantité de mouvement, n'étaient que les fondés de pouvoir du Créateur, ce qui dispensait ce dernier d'avoir encore à agir sur le monde matériel.

11 A Napoléon qui lui demandait où il plaçait Dieu dans son système du monde, le marquis de Laplace aurait répondu « qu'il n'avait pas eu besoin de cette hypothèse ».

Quant à Newton, pourtant plus technicien que les deux précédents, il imaginait curieusement un Dieu interventionniste, occupé à rafistoler les rouages de son œuvre en constante déglingue.

Quelle que soit la position adoptée vis-à-vis du statut des lois, leur existence et leur sens restent en définitive tout aussi mystérieux que ceux de Dieu. Pourquoi y a-t-il des lois en physique? Pourquoi le monde est-il mathématique¹²? Et, plus généralement, pourquoi est-il compréhensible? Le pouvoir de la raison humaine à comprendre l'univers a connu chez Einstein un de ses plus éclatants succès. Chez lui, la possibilité de la science faisait figure d'acte de foi (« Le Seigneur est subtil, mais il n'est pas malicieux »¹³) et pourtant restait inexplicable (« ce que le monde a et aura toujours d'inconcevable, c'est qu'il soit concevable »¹⁴). Toutes ces réflexions fondamentales ont préoccupé les plus grands penseurs au fil des siècles, mais le premier d'entre eux est probablement celui qui a le plus marqué, pour ne pas dire défini, la culture occidentale, davantage peut-être encore par les questions qu'il a posées que par les réponses qu'il y a données. C'est de lui que se réclameront Galilée et Kepler lors de l'édification de la science nouvelle¹⁵, et comme Einstein il était du clan de ceux qui croient en l'efficacité de la raison : nous voulons parler de Platon (428 — 348 avant J.C.).

La croyance en l'existence d'un monde mathématique objectif et à son adéquation au monde sensible est souvent appelée *platonicienne*, par référence au statut des mathématiques dans l'œuvre du grand philosophe antique¹⁶. Il faut s'entendre sur cette dénomination. « Platon lui-même prit souvent dans le platonisme l'autorité d'un maître que l'on fit ressembler plus à Pythagore qu'au vrai

Platon », nous fait remarquer K. Jaspers¹⁷, rejoignant l'opinion de W.G. Leibniz¹⁸ :

« Il faut comprendre Platon d'après ses propres écrits et non d'après Plotin ou Marsile Ficin qui ont falsifié l'enseignement de ce grand maître en ne recherchant chez lui que le merveilleux et le mystique... Car les pythagoriciens et les platoniciens, Plotin et Jamblique, et même Proclus, étaient tout enfermés dans leurs superstitions et se vantaient de faits miraculeux ».

Bien sûr, les pythagoriciens avaient déjà remarqué le pouvoir des nombres, mais leur approche était de nature assez mystique. L'intérêt que Platon accorde aux mathématiques et à la science en général, est par contre davantage philosophique et joue plutôt le rôle d'une étape intermédiaire et suggestive de la beauté dans le cheminement humain vers la connaissance des idées.

La théorie platonicienne de la connaissance est exposée à la fin du livre VI de *La République* sous la forme du *paradigme de la ligne*¹⁹. Essayons de l'expliquer en développant un exemple par ailleurs utilisé au livre VII, celui de l'astronomie.

Platon classe les objets de connaissance selon quatre niveaux hiérarchisés. Les objets relevant des deux niveaux inférieurs sont perceptibles par les *sens* et ceux des deux niveaux supérieurs, par la *pensée* seulement. Le premier niveau est celui des images, par exemple les projections de lumière simulant le firmament sur la voûte d'un planétarium. Domaine des illusions acoustiques et optiques, il n'est que le reflet du second niveau, celui des astres véritables dans le ciel. Ces derniers, en particulier les planètes, offrent à nos yeux des

12 Cette question constitue le titre d'un livre de J. D. Barrow, éditions Odile Jacob, 1996.

13 Cité par J. Merleau-Ponty, op. cit., p. 166.

14 Cité par J. Merleau-Ponty, op. cit., p. 239.

15 K. Jaspers, *Les grands philosophes*, tome 2, Plon, Paris, p. 161.

16 Voir en particulier *Timée* et les livres VI et VII de *La République*.

17 K. Jaspers, op. cit., pp. 153-154.

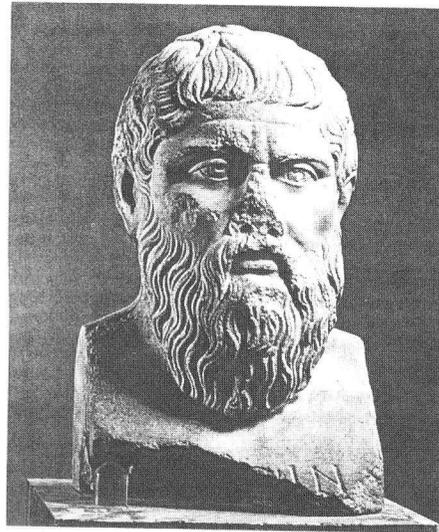
18 cité par K. Jaspers, op. cit., pp. 161-162.

19 L'explication est reprise, de façon imagée, au début du livre VII : c'est l'Allégorie de la caverne.

mouvements extrêmement compliqués. Platon imagine alors une autre façon de les appréhender, qui fait appel à la *raison*. Il s'agit de *voir par la pensée* les mouvements planétaires en apparence erratiques, comme étant constitués de superpositions de mouvements circulaires uniformes, c'est-à-dire d'imaginer chaque planète attachée à une sphère fictive tournant autour d'un axe, lui-même fiché dans une autre sphère tournant autour d'un axe orienté dans une autre direction, et ainsi de suite²⁰. Ces divers mouvements élémentaires sont une pure vue de l'esprit (contrairement à Aristote et à ses successeurs médiévaux, Platon ne postule pas la réalité matérielle de ces sphères), mais eux seuls pourtant méritent d'être appelés réels et vrais²¹. Leur combinaison permet de *sauver les apparences*, sans illusion cependant sur la valeur intrinsèque de sa concordance avec les faits²².

Nous sommes au troisième niveau, mathématique, transcendant le précédent et auquel correspond l'opération de l'esprit appelée *connaissance discursive*. Mais la mathématisation du réel ne constitue pas le sommet de la connaissance. Son intérêt est de nous procurer une intuition de la beauté : elle n'est que le reflet du quatrième et suprême niveau, le monde des idées, celui où se meut la pensée du philosophe, de l'épistémologue. Non pas le niveau de la connaissance de quelque chose, mais celui où la connaissance s'interroge sur la connaissance, où par la *voie dialectique* l'esprit se pose la question du *pourquoi* de cette

harmonie. Figés au troisième niveau, à l'état du constat, du *comment*, les pythagoriciens auraient négligé cette étape²³.



Buste de Platon,
Musée du Louvre

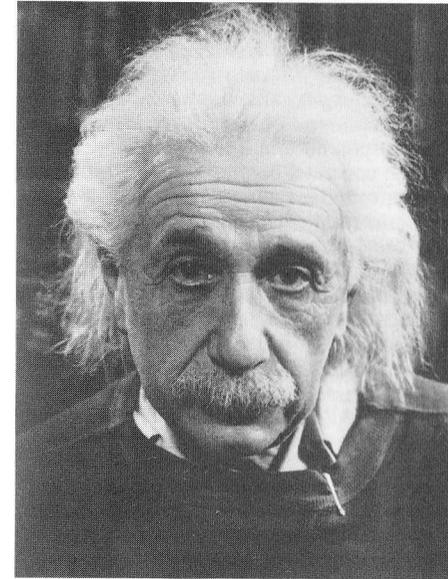
20 Le problème fondamental de l'astronomie mathématique posé par Platon sera précisément de trouver les vitesses angulaires et les axes des sphères restituant au mieux les mouvements des corps célestes. Eudoxe de Cnide imaginera des emboîtements de quatre sphères pour chacune des cinq planètes connues à l'époque, plus trois pour la Lune et trois pour le Soleil, en tout donc 26 sphères homocentriques. Ce modèle sera constamment affiné au cours des siècles, notamment par Aristote et Callippe de Cyzique au IV^e siècle av. J.C., puis par Ptolémée au second siècle après J.C. Il faudra attendre Kepler au XVII^e siècle pour voir l'ellipse détrôner cette tyrannie du cercle.

21 P. Duhem, *Le Système du Monde*, tome I, Hermann, p. 95.

22 « Il faut donc ... se servir des ornements variés du ciel comme d'exemples pour atteindre à la connaissance des choses invisibles, comme on ferait, si l'on trouvait des dessins de Dédale ou de quelque autre artiste ou peintre tracés et travaillés d'une main géniale. (...) le véritable astronome ... pensera que l'ouvrier du ciel et des astres que le ciel renferme les a disposés avec toute la beauté qu'on peut mettre en de tels ouvrages; mais quant aux rapports du jour à la nuit, du jour et de la nuit aux mois, des mois à l'année, et des autres astres au Soleil, à la Lune et à eux-mêmes, ne trouvera-t-il pas absurde, à ton avis, de croire qu'ils sont toujours pareils et ne subissent aucune variation, bien qu'ils soient matériels et visibles, et de chercher par tous les moyens à y saisir la réalité véritable? » Platon, *La République*, traduction de Emile Chambry, Gallimard, 1992, livre VII, paragraphe XI. Voir aussi la remarque 2 p. 256.

23 « Ils cherchent des nombres dans les accords qui frappent l'oreille; mais ils ne s'élèvent pas jusqu'aux problèmes qui consistent à se demander quels sont les nombres harmoniques et ceux qui ne le sont pas, et d'où vient entre eux cette différence. » Ibid., livre VII, XII, p. 258.

Intermédiaire entre le monde sensible qui tente de l'imiter et le monde des idées dont elle est le reflet, la mathématique permet maintenant à Platon d'expliquer l'intelligibilité du monde par sa théorie de l'*anamnèse*, ou de la *réminiscence* : elle découle du *souvenir* du monde des idées, que l'âme a contemplé avant son incarnation.



Einstein en 1947

On ne peut pas dire que la qualité dominante de toutes ces réponses soit leur performance en termes d'économie de pensée. Mais même en limitant leur rôle à ratifier le constat d'existence d'une certaine fonction des mathématiques, on doit au moins leur reconnaître le grand mérite d'avoir posé une problématique, comme nous l'avons déjà souligné, et restitué à l'*Homme* une place qu'il avait un peu perdue chez les philosophes présocratiques. L'objectif

de « sauver les apparences » ménage en effet au scientifique un certain champ de manœuvre, de créativité. On peut l'opposer à la méthode *positiviste*, selon laquelle la science doit s'en tenir aux *relations entre les faits*.

Einstein justement, après une jeunesse marquée par les idées de Mach et des positivistes, se détacha de plus en plus du principe empiriste de l'induction, comme en témoignent les lignes suivantes, écrites en 1946 :

« Ceci²⁴ illustre bien le fait que, même lorsqu'ils sont doués d'un esprit audacieux et d'une intuition très fine, les savants peuvent être freinés dans leurs interprétations des faits par des préjugés d'ordre philosophique. Dans ce cas précis, le préjugé — qui est loin d'avoir disparu — était de croire que les faits peuvent et doivent fournir une connaissance scientifique complète, sans l'élaboration d'une construction conceptuelle libre. Si une telle erreur est possible c'est parce que l'on ne peut pas facilement réaliser le caractère arbitraire des concepts choisis, concepts qui, par leur confirmation pratique et leur emploi à long terme, semblent être reliés tout naturellement au matériel empirique »²⁵.

Probablement son succès dans l'édification de la relativité générale lui a-t-il suggéré cette émancipation par rapport aux faits. Pour comprendre cela, il faut d'abord remarquer que la théorie einsteinienne de la gravitation rend compte de phénomènes quasiment identiques à celle de Newton (du moins à l'échelle du système solaire) tout en étant conceptuellement très éloignée : la deuxième interprète les trajectoires courbes des planètes à l'aide d'une force agissant dans un espace-temps plat; la première supprime cette force et postule des trajectoires « droites » dans un espace-

24 Einstein dénonce ici l'attitude positiviste des adversaires de la théorie atomique avant l'interprétation atomistique du mouvement brownien qu'il proposa lui-même en 1905.

25 A. Einstein, *Autoportrait*, InterEditions, 1980, p. 48.

temps courbe²⁶. Mais ce n'est pas tout : dans quelle mesure peut-on affirmer que l'espace-temps est *vraiment* courbe? Est-ce une découverte ou une invention d'Einstein?

C'est une *invention*, et l'analogie suivante va nous aider à le comprendre. Imaginons une sphère munie du système classique de graduations en longitude et en latitude, et supposons qu'il règne sur cette variété un *champ de température* tel qu'une tige de métal promenée de point en point s'y contracte instantanément et proportionnellement au cosinus de la latitude. Plus on s'éloigne de l'équateur, plus la tige est courte. Mais si la tige *définit* le « mètre » unité, alors la longueur mesurée de tous les parallèles sera identique. On aura reconnu là les caractéristiques métriques du cylindre : les lignes verticales sur le cylindre correspondent aux méridiens, les cercles horizontaux aux parallèles. On dit que l'on a muni notre variété d'une métrique de surface plane²⁷, c'est-à-dire sans courbure : on peut en effet dérouler le cylindre sur une feuille de papier. *L'interprétation en termes de courbure ou non résulte donc de l'existence du champ de température sur la surface.* On peut dès lors se demander laquelle des deux, plane ou courbe, constitue sa véritable géométrie. A cette question Henri Poincaré répondait :

« Elle n'a aucun sens. Autant demander si le système métrique est vrai et les anciennes mesures fausses (...) Une géométrie ne peut pas être plus vraie qu'une autre; elle peut seulement être plus commode. »²⁸.

Voyons à présent plus généralement comment la physique classique aborde cette problématique de la géométrie. Ce que l'on appelle *droite* y est en dernière analyse schématisé par les trajectoires des rayons lumineux. *Définis* comme géodésiques de l'espace, ils déterminent une structure affine, c'est-à-dire un critère de parallélisme, expérimentalement compatible²⁹ avec la définition standard de la métrique euclidienne, qui résulte de la proposition suivante : *à deux points d'un corps pratiquement rigide correspond toujours la même distance (mesurée en ligne droite) quelles que soient les diverses positions occupées par ce corps.* En effet cette définition fait correspondre à la ligne droite une représentation concrète, comme étant la courbe de longueur minimale entre deux points donnés, et expérimentalement ces lignes coïncident bien avec les rayons lumineux. Elle permet d'appliquer au monde physique toute la géométrie classique découlant des axiomes d'Euclide et en particulier d'établir un système de coordonnées^{30,31}. Pour cela, on déplace un mètre étalon de point en point le long de droites perpendiculaires entre elles et l'on décide qu'à chaque étape l'extrémité du mètre correspond à une coordonnée d'une unité supérieure à son origine.

C'est le même point de vue qui est adopté par la relativité restreinte dans un référentiel inertiel donné. Mais le rôle joué par la lumière s'y est accru encore du fait que les trajectoires des rayons lumineux déterminent maintenant les géodésiques de longueur nulle de

l'espace-temps. Cette interprétation géométrique a été suggérée par Minkowski en 1908 et constitue la forme mathématique du second postulat de la relativité restreinte, l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide. Elle est lourde de conséquences pour la relativité générale. Supposons en effet que le mouvement de la lumière dans une configuration donnée de masses soit un *fait* d'expérience. Einstein a fini par se rendre compte qu'en présence d'un champ de gravitation, *le plus simple était encore de maintenir la décision selon laquelle ces trajectoires resteraient des géodésiques nulles de l'espace-temps.* Mais ceci lui a alors imposé de tenir compte, pour ce dernier, de l'existence d'une courbure^{32,33}.

Afin d'illustrer par un autre exemple ces réflexions consacrées à la part de *convention* inhérente à tout système scientifique, examinons le postulat d'invariance de *c* en relativité restreinte. Pour mesurer la vitesse d'un corps dans un référentiel donné, en plus du système de coordonnées permettant d'évaluer les distances il faut disposer en tout point d'horloges synchrones, c'est-à-dire indiquant simultanément des temps identiques, l'idée étant la suivante : si le mobile passe devant la graduation 0 à un moment donné lu sur une horloge A et devant la graduation 1 une seconde plus tard lue sur une horloge B synchrone, on dira que sa vitesse moyenne est égale à 1 mètre par seconde. Cependant, se demande Einstein en 1905, quel sens faut-il donner à la notion de simultanéité de deux événements distants dans l'espace? Il propose alors la définition opérationnelle suivante : dans un référentiel inertiel donné, deux événements se produisant respectivement en A et en B sont dits simultanés si la lumière qu'ils émettent parvient en même temps au point M situé à mi-chemin sur la droite qui les sépare. Mais alors,

« Dire que la lumière met le même temps à parcourir le chemin AM que la distance BM ne constitue pas, en réalité, une supposition ou une hypothèse sur la nature physique de la lumière, mais une convention que je peux faire librement, pour parvenir à une définition de la simultanéité. »³⁴.

Cette latitude dans l'énoncé des postulats de base d'une théorie ne doit tout de même pas donner l'illusion que les théoriciens n'ont de compte à rendre à personne. Tous les choix ne sont pas équivalents, il en est de plus commodes que d'autres, comme le fait remarquer Poincaré dans le texte cité plus haut. En effet, d'un point de vue moins axiomatique mais plus pratique, par exemple pour mesurer la vitesse des voitures lors d'une compétition automobile, on peut imaginer de construire en A deux horloges de même fabrication et de les synchroniser, puis de déplacer une des deux horloges jusqu'au point B. L'interprétation la plus simple que l'on puisse faire de l'expérience de Michelson-Morley quant à la vitesse de la lumière *mesurée* dans de telles conditions, est alors sa constance par rapport au moment de l'expérience et à la direction AB. La définition d'Einstein de la simultanéité est certes plus satisfaisante pour le théoricien parce qu'elle confère une « certitude » axiomatique à ce qui n'était jusqu'alors qu'une suggestion de l'expérience. Mais si cette suggestion n'existait pas, et notamment si deux événements simultanés à un même troisième ne l'étaient pas entre eux, il faudrait renoncer au principe de l'invariance de *c*. Par ailleurs, la possibilité de synchroniser deux horloges est elle-même un fait empirique. Tout l'art consiste donc à choisir des conventions suffisamment raisonnables pour que la théorie soit *simple*.

26 Pour la notion de courbure d'un espace, voir par exemple A. Lausberg, « Notre espace est-il courbe? », *Le Ciel*, mai 1995 pp. 170-176 et juin 1995 pp. 211-222.

27 Il est d'ailleurs bien connu que la métrique traditionnelle de la sphère, dérivée de son immersion dans un espace euclidien, est *conformément* euclidienne avec un facteur conforme variant comme le cosinus de la latitude. La métrique définie par un « mètre » variant comme le cosinus de la latitude est compatible avec la connexion affine selon laquelle tous les méridiens et *tous les parallèles* seraient des géodésiques.

28 H. Poincaré, *La science et l'hypothèse*, Flammarion, 1968, p. 76.

29 Du point de vue de la géométrie affine, les géodésiques sont les courbes dont le vecteur tangent est transporté parallèlement dans sa propre direction. Dans le cas d'une connexion riemannienne, elles optimisent en plus la distance entre deux points voisins donnés.

30 A. Einstein, *La théorie de la relativité restreinte et généralisée*, traduction de J. Rouvière, Gauthier-Villars, 1921, p. 3.

31 Voir également A. Einstein, « La géométrie et l'expérience », dans *Réflexions sur l'électrodynamique, l'éther, la géométrie et la relativité*, Gauthier-Villars, 1972, pp. 75-91.

32 Techniquement parlant, la connaissance des géodésiques *nulles* suffit pour déterminer une dérivée covariante symétrique (sans torsion), donc la métrique si l'on postule une connexion riemannienne.

33 Pour toutes ces questions concernant les géométries non euclidiennes, la géométrie physique et la « question philosophique » de l'espace, mentionnons l'ouvrage de L. Boi, *Le problème mathématique de l'espace, une quête de l'intelligible*, Springer, 1995, pp. 387-413.

34 A. Einstein, *La théorie de la relativité restreinte et généralisée*, op. cit., p. 19.

Les convictions philosophiques d'Einstein qui le rattachent au *réalisme*, selon lequel la science peut et doit décrire le monde naturel de façon complète et adéquate, quand bien même l'origine de cette possibilité demeurerait incompréhensible. La complétude de la description en termes d'équations mathématiques est inséparable d'une vision déterministe du monde (qu'il ne faut cependant pas confondre avec la notion de *causalité stricte*, prise dans l'acception de *liaison véritable et objective*. Cette distinction, à l'origine des recherches philosophiques de Hume et de Kant, permet de dégager entre le phénomène et la chose en soi un intervalle que selon les écoles on peut appeler *interprétation* ou encore *grille de lecture*). La relativité générale, en effet profondément déterministe, évoque d'ailleurs assez le monde figé décrit par Antoine Roquentin dans *La nausée* de Sartre :

« Je vois l'avenir. Il est là, posé dans la rue, à peine plus pâle que le présent. Qu'a-t-il besoin de se réaliser? Qu'est-ce que ça lui donnera de plus? (...) C'est ça le temps, le temps tout nu, ça vient lentement à l'existence, ça se fait attendre et quand ça vient, on est écœuré parce qu'on s'aperçoit que c'était déjà là depuis longtemps. »³⁵.

Or, la description traditionnellement admise de la physique à l'échelle microscopique, la mécanique quantique, est probabiliste et statistique. Qui plus est, la lumière y est considérée selon les situations expérimentales, soit comme un ensemble de particules (les *photons*), soit comme une onde. C'est ce que l'on a appelé la *dualité onde-corpuscule*. Einstein était donc bien loin de souscrire à cette interprétation, plus, semble-t-il, du fait de son incomplétude présumée qu'en raison de son indéterminisme, qui n'en serait que la conséquence : il n'admettait pas l'idée que des éléments de la réalité pussent se trouver sans correspondant au niveau du traitement

mathématique d'une théorie³⁶. Comme l'exprime si justement J. Merleau-Ponty,

« Cette exigence d'une représentation cohérente des éléments de la réalité physique est évidemment à la source des réserves insurmontables d'Einstein à l'égard des théories quantiques développées à partir de 1925; si, pour lui, ces théories ne sont pas satisfaisantes malgré leurs remarquables succès dans la description et la prévision de phénomènes, c'est qu'elles ne sont justement pas « complètes » en ce sens qu'elles ne fournissent pas une représentation des phénomènes élémentaires satisfaisant aux exigences de l'ontologie rationnelle. L'accord entre Einstein et Bohr était impossible, parce que le second ne croyait ni à la nécessité épistémologique, ni à la possibilité pour la philosophie de la nature de satisfaire à ces exigences ontologiques; selon Bohr l'étant naturel ultime se dérobe toujours par quelque côté; la convergence des perspectives sous lesquelles on le regarde est une illusion, chacune brouillant l'image que donne l'autre alors que pour Einstein cette convergence est inscrite dans la nature des choses; toute théorie qui la manque est, en dernière analyse, inadéquate. »³⁷.

Feynman a conçu une formulation de l'électrodynamique quantique selon laquelle un photon, au lieu de suivre une géodésique, décrit en fait une trajectoire arbitraire à laquelle est associée une certaine amplitude mathématique calculable par quelques recettes simples. Lorsque l'on étudie l'effet moyen produit par un ensemble suffisamment important de particules, on retrouve les lois macroscopiques de la propagation en ligne droite de la lumière, de la réflexion, de la réfraction, de la diffraction³⁸. Ce formalisme en termes d'*intégrales de chemin* a ceci d'intéressant qu'il permet d'échapper à la dualité onde-corpuscule en

maintenant la description intuitive de la lumière en termes de particules :

« Je ne saurais trop insister sur cet aspect de la lumière : la lumière est faite de particules. Il est très important — particulièrement pour ceux d'entre vous qui ont été à l'école, et à qui on a appris que la lumière se comporte comme une onde — de savoir que la lumière se comporte comme des particules. Croyez-moi : la lumière se comporte *en réalité* comme des particules. »³⁹.



Feynman

De plus, il met bien en relief l'influence de l'échelle d'observation des phénomènes dans l'espace et dans le temps, humaine en l'occurrence, sur leur aspect.

Peut-on dès lors franchir la dernière étape et envisager une représentation *existentialiste* selon laquelle la science, complètement subjective, ne reflèterait au fond que nos propres structures mentales? On ne peut bien sûr nier

que les lois *existent* et possèdent un pouvoir prédictif, mais notre tendance à leur prêter un *sens* repose, il faut bien le dire, sur notre croyance en leur objectivité. Si cette dernière était mise en cause, il n'y aurait en fait pas de lois, mais rien que des modèles, au pire de simples formules. Aussi arbitraire que les figures attribuées aux constellations dans le ciel, où de tout temps les peuples ont vu dans des groupes d'étoiles dispersées de façon *contingente* une *signification* d'ailleurs variable avec leur culture, la science assurerait une fonction d'ajustement des données sensorielles, un peu comme en astronomie la « loi » de Titius-Bode qui donne les distances des planètes au Soleil. Elle résulterait d'un processus d'adaptation biologique basé sur la réduction de la profusion des informations sensibles qui nous parviennent à tout instant. Vue ainsi elle continuerait à assumer son double rôle, rassurant et efficace, mais rien d'étonnant dans ces conditions à ce que les paradoxes, en particulier ceux de la mécanique quantique, accourent au galop dès que l'on s'éloigne de l'échelle de perception humaine.

Tout cela est possible, mais il ne faudrait de toute façon pas en déduire qu'en-dehors de cette structuration spontanée du monde sensible par le cerveau c'est l'anarchie totale qui règne. Il semble exister au moins un degré supérieur d'objectivité, celui du *déterminisme statistique* : un théorème mathématique dû à Kolmogorov démontre que les phénomènes purement *contingents* obéissent en fait aux lois du *calcul des probabilités*. Comme l'écrit Ivar Ekeland⁴⁰ :

« Nous n'esquiverons pas le déterminisme. Chassez-le par la porte, en postulant une incohérence totale, il rentre par la fenêtre, sous le couvert de lois statistiques. Sa nature nous échappe, qu'il soit magique ou mathématique, analogique ou mécanique, mais sa présence semble être une nécessité logique, établie de manière irréfutable par Kolmogorov et ses disciples. ».

35 J.-P. Sartre, *La nausée*, Gallimard, 1938, p. 51.

36 C'est le thème de son article « Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? » écrit en collaboration avec B. Podolsky et N. Rosen, *Phys. Rev.* 47, pp. 777-780 (1935). La prédictibilité d'un phénomène physique y est présentée comme condition suffisante de sa réalité.

37 J. Merleau-Ponty, op. cit., pp. 236-237.

38 R. Feynman, *Lumière et matière*, Points Sciences S86, Seuil, 1987.

39 Ibid., p. 31.

40 I. Ekeland, *Au hasard*, Seuil, 1991, p. 64.



Einstein en 1952

L'avenir donnera-t-il raison aux conceptions philosophiques d'Einstein, dont il a dit lui-même qu'elles sous-tendaient sa pensée scientifique⁴¹? Cela n'est pas sûr, si l'on en juge par des résultats expérimentaux récents tendant à montrer que la mécanique quantique dans son formalisme orthodoxe *est*

effectivement complète. Mais quitte à être considérée dans le futur comme le dernier feu d'une conception éventuellement dépassée de la physique, l'œuvre d'Einstein et en particulier la théorie de la relativité n'en continuera pas moins de briller dans l'histoire de la pensée humaine comme l'un de ses plus beaux bijoux.

41 J. Merleau-Ponty, op. cit., pp. 246-247.