

## Einstein et la conception physique de l'espace et du temps<sup>1</sup>

HERVE BARREAU

CNRS-Strasbourg-Nancy

Einstein est considéré comme l'inventeur de la théorie de la relativité. C'est parfaitement exact, mais il est également le réformateur des conceptions physiques de l'espace et du temps. En fait il est l'un et l'autre, et, comme nous le verrons, il est l'un par l'autre. Si j'ai choisi ici de mettre l'accent sur son rôle de réformateur des conceptions physiques de l'espace et du temps, c'est pour deux raisons, qui sont apparentées. D'abord, la conception de la relativité du mouvement remonte à Copernic et à Galilée; pour en parler, il faudrait faire toute l'histoire de la science moderne, ce qui nous entraînerait trop loin. Ensuite, parce que cette histoire est l'occasion, pour certains, de minimiser l'importance d'Einstein. On trouve aujourd'hui des historiens des sciences qui, s'ils sont français, et, en particulier, polytechniciens, s'attachent à grandir l'importance d'Henri Poincaré, qui n'a pas besoin de ce surcroît de gloire, bien qu'il ait joué incontestablement à l'égard d'Einstein, un rôle d'inspirateur, mais d'inspirateur seulement. Les conceptions d'Einstein et de Poincaré sur la relativité sont profondément différentes, et l'on en a une preuve suffisante dans le fait que Poincaré, qui a fait des contributions importantes sur le sujet en 1905, au moment même où Einstein rédigeait et envoyait son article fondateur - nous en célébrons cette année (2005) le centenaire - Poincaré, dis-je, n'a jamais reconnu les conceptions d'Einstein comme le prolongement des siennes propres, et en a même fait la critique en 1911, dans une conférence faite à Londres, un an

---

<sup>1</sup> Cet article est paru en version abrégée dans *Les Annales de l'Académie d'Alsace*, n°71, 2005, 72-90.

Cette parution faisait suite à la conférence de même titre donnée, dans le cadre de l'Académie d'Alsace, le 6 février 2005 à Colmar, en séance publique d'hiver dédiée à "Hommage à Pierre Teilhard de Chardin et Albert Einstein"

avant sa mort. Dans cette conférence, Poincaré n'envisageait nullement l'extension des idées de la Relativité (le R majuscule désigne ici qu'il s'agit de la théorie physique) à l'étude de l'Univers, ce qu'Einstein réussit à faire, nous le verrons, en 1917. Voilà une troisième raison pour centrer cet exposé sur la réforme des conceptions physiques de l'espace et du temps que nous devons à Einstein. Nous allons montrer que cette réforme s'est opérée en trois étapes: d'abord pour offrir une théorie nouvelle de la Relativité quand elle s'applique à des repères inertiels, qui sont, les uns vis-à-vis des autres, en déplacement rectiligne et uniforme ( c'est ce qu'on appelle la Relativité restreinte), ensuite pour réaliser l'élargissement de la Relativité aux systèmes accélérés, c'est-à-dire, comme Einstein a eu le mérite de le montrer le premier, aux systèmes plongés dans des champs de gravitation ( c'est ce qu'on appelle la Relativité générale), et enfin pour montrer qu'en utilisant la théorie relativiste de la gravitation, Einstein a ouvert la voie à la cosmologie contemporaine, en lui permettant de se fonder sur les idées d'espace cosmique et de temps cosmique. Le physicien qui a accompli ces trois exploits mérite bien qu'on célèbre en 2005 le cinquantenaire de sa disparition.

## 1 L'espace et le temps relatifs

Considérons d'abord le premier exploit. Le principe classique de relativité affirme que les lois de la Mécanique sont les mêmes pour des repères inertiels (on appelle repères inertiels des repères où des mobiles, n'étant soumis à aucune force, obéissent au principe d'inertie, que nous allons préciser), à condition que ces repères soient en déplacement rectiligne et uniforme les uns vis-à-vis des autres. Les mesures faites sur ces mobiles sont évidemment différentes dans la direction du mouvement relatif, mais les autres mesures spatiales sont les mêmes, et également la mesure du temps, qui joue le rôle de grandeur physique universelle. Cela n'a rien d'étonnant puisque le principe d'inertie stipule justement qu'un corps, qui n'est soumis à aucune force, se trouve soit en repos, soit en mouvement rectiligne et uniforme. Il y a un lien constitutif entre le principe d'inertie et le principe de relativité, et c'est le mérite d'Einstein, comme nous le verrons, d'avoir approfondi ce lien jusqu'à en faire le fondement de la physique. Cependant pour qu'un corps soit soustrait à toute influence extérieure, il faut qu'il soit complètement isolé, ce qu'il est impossible à la rigueur de trouver, ni de réaliser. Newton avait bien conscience de cette impossibilité et c'est pourquoi il proposait des substituts suffisants au repère inertiel idéal, par exemple, un trièdre dont le sommet est le centre du Soleil et les directions celles marquées par la position d'étoiles fixes. Newton estimait nécessaire

cependant de réaliser le repère inertiel idéal dans l'espace absolu, un milieu immobile, tout à fait homogène et isotrope. Comme l'a dit fort justement Euler au XVIII<sup>ème</sup> siècle: "l'espace absolu de Newton est le garant de la validité du principe d'inertie". Or, à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, les physiciens se demandaient si un tel garant métaphysique, étranger à la science, était tout à fait nécessaire; parmi ces physiciens se trouvaient Ernst Mach et Henri Poincaré, dont le jeune Einstein connaissait les écrits et partageait les critiques, plus ou moins radicales (elles l'étaient moins s'il s'agit de Poincaré) qu'ils adressaient à la mécanique classique.

Cependant s'était développé entre temps un autre compartiment de la physique, celui de l'optique et de l'électromagnétisme. L'optique était devenue ondulatoire avec Young et Fresnel. Maxwell avait montré que l'électromagnétisme, qui faisait prévaloir l'action continue des champs électromagnétiques sur les interactions à distance de la gravitation newtonienne, englobait l'optique et que la lumière était donc une ondulation électromagnétique. Or les vagues de la mer n'ont d'existence que dans l'eau; le son réclame de l'air pour se propager; de la même façon les ondes de lumière, pensait-on, se propagent dans le milieu impondérable qu'est l'éther. C'était d'ailleurs une question de savoir si cet éther était entraîné par les corps qui s'y meuvent, et certaines expériences tendaient à le faire croire. L'expérience de Michelson fut précisément montée afin de manifester ce qu'on n'avait jamais pu mettre en évidence jusqu'alors, à savoir le déplacement de la Terre par rapport à l'éther. Si un bras de l'interféromètre de Michelson se trouve orienté dans le sens du mouvement de la Terre par rapport à l'éther, alors un faisceau lumineux qui est dirigé dans ce sens, fait un trajet aller/retour plus court que le faisceau lumineux qui est dirigé perpendiculairement à celui-ci. On devrait s'apercevoir de ce raccourcissement quand on fait tourner l'appareil de 90°, car les franges d'interférence devraient se déplacer, manifestant ainsi la différence entre les deux trajets de la lumière. Or on ne constate rien de tel. Pour expliquer le phénomène, le grand spécialiste de l'électromagnétisme qu'était à cette époque Lorentz, postula que l'éther était absolument immobile, mais que le bras de l'interféromètre qui se trouve dans la direction du mouvement de la Terre par rapport à l'éther, subit une contraction. Ce n'est pas suffisant car, puisqu'on trouve que la vitesse de la lumière est toujours la même dans toutes les directions et ne dépend pas du mouvement de sa source, il faut supposer que dans les repères qui sont en mouvement par rapport à l'éther, il y a une dilatation des durées, ou, si l'on préfère, que le temps de l'éther, le seul temps vrai pour Lorentz, va plus rapidement que les temps apparents dits locaux. On aboutit alors à des formules de changement de coordonnées,

qui se trouvent être les mêmes, que celles qu'avait proposées dès 1886 le physicien Voigt, comme devant assurer la validité du principe de relativité dans l'électromagnétisme (validité bien attestée, de son côté, par l'expérience). Elles jouent en ce domaine le même rôle que les transformations dites de Galilée, celles qui ont été mentionnées plus haut, jouent pour la mécanique classique, c'est-à-dire que, moyennant les relations qu'elles posent entre les mesures d'espace et de temps, les mêmes lois (n'importe quelle loi et pas seulement le principe d'inertie) s'appliquent dans la classe des repères inertiels. Les formules qui permettent de passer d'un repère à l'autre sont seulement différentes de celles de la Mécanique classique. A ces formules, qui étaient valables alors pour l'électromagnétisme seulement, Poincaré donna le nom de "transformations de Lorentz" et il montra qu'elles forment un groupe au sens algébrique du terme, mais Poincaré ne mit nullement en doute l'hypothèse fondamentale de Lorentz, à savoir l'immobilité de l'éther, qui jouait ainsi le rôle que Newton avait dévolu à l'espace absolu. .

Cette solution était ingénieuse, mais tout à fait déroutante et même contradictoire. Car on n'attribue en physique un caractère réel, ou du moins objectif, qu'à une grandeur qui se manifeste d'une certaine façon et dont on ne peut se passer pour rendre compte des phénomènes. Or l'éther se déroba à toute manifestation et son introduction, quoique commode à certains égards (quand se posait une difficulté que son existence pouvait résoudre), n'était nullement nécessaire. De plus il est étrange de supposer une contraction uniforme pour tous les corps qui se déplacent dans l'éther, quelle que soit leur composition matérielle. Enfin des "temps locaux", qui vont plus lentement que le temps vrai, ne sont ici postulés que pour satisfaire l'évidence empirique de la constance de la vitesse de la lumière dans toute sorte de repère inertiel. Comme Einstein l'a remarqué à plusieurs reprises, la solution de Lorentz consiste à satisfaire le principe empirique de la constance de la vitesse de la lumière, mais au détriment du principe de relativité. Ce principe n'est respecté qu'en apparence (puisque les mêmes lois s'appliquent, c'est vrai, grâce aux conditions requises par les transformations de Lorentz) mais il est rejeté en fait, puisque le repère de l'éther est privilégié par rapport à tous les autres, bien qu'il soit impossible de le détecter. Il fallait trouver une autre façon de concilier les deux principes.

L'histoire rapporte que le jeune Einstein - il avait 26 ans - obtint de son directeur l'autorisation, obtenue sous un banal prétexte, de discuter durant toute une journée avec son collègue et ami Besso, expert comme lui au bureau des brevets de Berne. La discussion ne put aboutir, mais le lendemain matin Einstein déclara à Besso : "Merci. J'ai complètement résolu le

problème. Il faut partir d'une analyse du concept de temps. Il existe une relation inséparable entre le temps et la vitesse du signal<sup>2</sup>. Einstein avait réfléchi toute la nuit et finalement trouvé la solution. Il acheva rapidement l'article qu'il devait envoyer aux *Annalen der Physik*. L'originalité de la position défendue ne permettait guère de faire des références, qui furent réduites au minimum. Mais l'*Introduction* de l'article était fort claire et ne cachait rien de l'intention de l'auteur, qui présentait ainsi les données du problème: d'un côté le principe de relativité s'impose en optique et en électromagnétisme, comme il s'impose en mécanique, puisqu'il est impossible de mettre en évidence un mouvement absolu, qu'il s'agisse du mouvement relatif d'un aimant et d'une bobine lors de la naissance d'un courant électrique ou qu'il s'agisse d'un mouvement relatif de la Terre par rapport à des sources de lumière; d'un autre côté le principe de la constance de la vitesse de la lumière s'impose tout autant. A propos de ce dernier principe, Einstein note incidemment qu'il, "n'est qu'en apparence incompatible avec le principe (de relativité)". Il est difficile de ne pas voir dans cette courte incise une critique implicite de la théorie de Lorentz qui dominait alors. Einstein ajoute, du reste, qu'en postulant les deux principes "il est possible de construire une électrodynamique des corps en mouvement simple et exempte de contradiction". Pour faire bonne mesure et ne laisser aucun doute sur son entreprise, le jeune théoricien ajoute encore: "On verra que l'introduction d'un "éther lumineux" devient superflue par le fait que notre conception ne fait aucun usage d'un "espace absolu" au repos doué de propriétés particulières, et ne fait pas correspondre à un point de l'espace vide, où ont lieu les processus électromagnétiques, un vecteur de vitesse (sous entendu par rapport à l'éther qui remplirait cet espace vide)".

C'est donc une théorie alternative à celle de Lorentz que propose en 1905 le jeune Einstein<sup>3</sup>. Ce n'est pas le lieu d'exposer cette théorie de bout en bout. Mais puisqu'on a choisi de montrer en Einstein le réformateur des concepts physiques d'espace et de temps, plutôt que l'inventeur de la théorie de la Relativité, qu'il est indubitablement dans la forme radicale qu'il lui a donnée, il est utile de commenter un peu la déclaration matinale que fit Einstein à Besso. Il suffit de retracer les lignes principales de la première section de la Première Partie de l'article de 1905, qui est consacrée à la cinématique. Cette discipline est la théorie de l'espace et du temps, qui

---

<sup>2</sup> Cette anecdote est relatée par François de Closets dans son livre sur Einstein, *Ne dites pas à Dieu ce qu'il doit faire*, Seuil, 2004, p. 149

<sup>3</sup> L'incompatibilité théorique des deux théories est bien marquée dans l'article de Martin Carrier "Semantic Incommensurability and Empirical comparability", *Philosophia Scientiae*, 2004, vol. 8, cahier 1, 78-80

envisage le mouvement pur, abstraction faite de toute masse et de toute force. Commençons par l'analyse du concept de temps. "Tous nos jugements dans lesquels le temps joue un rôle, écrit Einstein, sont toujours des jugements sur des événements *simultanés*". Einstein fait allusion ici à une pratique scientifique, qui n'est que le prolongement d'une pratique de la vie ordinaire, quand cette dernière s'avise de dater un événement avec précision. Il s'agit de relever la simultanéité de cet événement avec l'indication de l'aiguille d'une horloge. Le temps physique est du temps mesuré. L'horloge est pour le temps physique ce que la règle rigide est, comme Einstein vient de le montrer, pour l'espace physique : un moyen de mesure, qu'il s'agisse d'une distance dans un cas ou d'une durée dans l'autre. Quand l'horloge est proche de l'événement considéré, la procédure ne présente aucune difficulté. Mais que faire quand il s'agit d'événements distants, ceux dont le signal ne parvient à l'horloge qu'après un certain temps? Il faut se donner, dit Einstein, une convention qui soit applicable dans chaque repère et fournisse pour ce repère une mesure unique. Si l'on considère donc deux observateurs, en repos l'un en regard de l'autre, et situés en deux lieux différents, disons A et B, le problème est d'établir "un temps commun à A et à B". Ce temps commun ne peut être établi que si l'on pose *par définition*, que le temps nécessaire à la lumière pour aller de A à B est égal au temps qu'elle met pour aller de B à A. Supposons qu'un rayon lumineux parte à l'instant  $t_A$  de A vers B, qu'il soit réfléchi en B à l'instant  $t_B$  et qu'il soit de retour en A à l'instant  $t'_A$ . Les deux horloges sont par définition synchrones si :

$$t_B - t_A = t'_A - t_B$$

Einstein ajoute, pour bien marquer que ces conventions sont en parfait accord avec les deux postulats retenus "Conformément à l'expérience (le lecteur peut penser, en particulier, à l'expérience de Michelson), nous admettons en outre que la grandeur  $2AB/(t'_A - t_A) = c$  (Einstein écrit  $V$ , comme à son époque, à la place de  $c$ ) est une constante universelle (la vitesse de la lumière dans le vide)".

Le section suivante de la partie cinématique est consacrée à la "relativité des longueurs et des temps" et trace en quelque sorte les conséquences de la façon plus haut décrite d'établir le temps d'un repère, une façon qui est opératoire, mais guidée par des postulats théoriques. C'est là qu'Einstein montre son originalité, dans son obstination à s'en tenir à la méthode qu'il a définie et qui est susceptible, on va le voir, de réformer profondément la physique. Il commence d'abord par les longueurs. Soit une tige rigide au repos, et soit  $l$  sa longueur, telle qu'elle est mesurée avec une règle

également en repos par rapport à la tige. Supposons maintenant que la tige subisse une translation à la vitesse  $v$ , le long d'une ligne qui coïncide avec l'axe  $x$  du repère dans lequel la tige était en repos. Quelle est maintenant la longueur de la tige qui se trouve en mouvement?

Il faut distinguer deux cas, déclare Einstein:

Premier cas: l'observateur muni de la règle de mesure se déplace avec la tige qu'il s'agit de mesurer. Alors, selon le principe de relativité, dit Einstein, il n'y a rien de changé par rapport à la situation précédente. Puisque la tige et l'observateur sont en repos l'un vis-à-vis de l'autre, la longueur de la tige est  $l$ . Remarquons que Lorentz posait tout autre chose avec son hypothèse de la "contraction des longueurs", qui faisait intervenir l'éther comme espace absolu.

Deuxième cas: l'observateur n'accompagne pas la tige qui se déplace mais reste dans le repère dit "au repos". Alors ce ne peut être qu'au moyen d'horloges synchrones dans ce repère dit "au repos" que l'observateur peut marquer dans son repère à lui, au même instant  $t$  de ses horloges, les deux points extrêmes de la tige, dont la longueur se trouve pour ainsi dire fixée en cet instant. On ne peut pas savoir, à ce point du développement de la théorie, quelle sera exactement cette longueur par rapport à  $l$ , mais on peut augurer que cette mesure sera différente de  $l$ , en raison de la relativité de la simultanéité et de la durée, une relativité qu'il va falloir définir par rapport au repère d'où est effectuée la mesure, comme nous allons le voir.

Soit donc la détermination des durées, qui sont faites au moyen d'horloges. Nous avons vu comment s'opère, dans un repère, la définition de la synchronicité des horloges de ce repère. Supposons donc qu'il y ait 2 observateurs placés chacun à l'une des extrémités de la tige. Einstein conçoit que ces deux observateurs n'ont pas à régler leurs horloges même après que la tige s'est mise en mouvement, puisque le principe de relativité les assure que le réglage de leurs horloges demeure, mais qu'ils s'intéressent aux indications des horloges du repère "au repos", horloges qui défilent donc devant eux. Einstein imagine aussi que ces deux observateurs ne procèdent pas à la mesure spatiale de la tige, mais qu'ils demandent aux observateurs d'en face quelle est sa longueur selon la méthode déterminée dans le paragraphe précédent. En bref ces deux observateurs, emportés dans le mouvement de la tige, empruntent aux observateurs du repère en repos les mesures tant spatiales que temporelles de la tige en mouvement. Alors pour l'observateur en B:  $t_B - t_A = r_{AB} / V - v$  ( $r_{AB}$  est la longueur de la tige mesurée, selon la méthode prescrite dans le paragraphe précédent, à partir du repère en repos).

Et pour l'observateur en A:  $t'_A - t'_B = r_{AB} / V + v$

Donc pour ces observateurs, s' ils adhèrent au principe de la constance de la vitesse de la lumière, comme le leur demande Einstein:

$$t_B - t_A \neq t'_A - t_B$$

Ces horloges ne sont plus synchrones pour eux, alors qu'elles restent évidemment synchrones pour les observateurs du repère "au repos".

On a reproché ici à Einstein d'utiliser une règle de composition des vitesses qu'il va renverser par la suite pour la remplacer par une autre. Mais ce reproche ne me semble pas justifié, bien qu'Einstein n'utilise plus cet argument dans son exposé plus populaire qui parut en 1917. Dans cet exposé il y substitue une argumentation entièrement intuitive : soit un train en déplacement sur une voie de chemin de fer et un observateur situé sur la voie au milieu du train, mesuré par rapport à lui ; cet observateur reçoit en même temps des signaux envoyés en même temps (par rapport à la voie) aux extrémités du train, alors qu'un voyageur qui lui faisait face au moment de l'envoi des flashes lumineux, reçoit l'un de ces flashes avant l'autre. Ce dernier argument est suffisant pour mettre en cause l'idée de simultanéité absolue, mais il ne se réfère pas à la méthode plus haut définie, qui établit une simultanéité relative. C'est pourquoi l'argument de l'article de 1905 est plus fort, et il suffit, pour le rendre irréprochable dans la nouvelle théorie, de le rendre indépendant d'une règle de composition quelconque des vitesses. En fait, il ne s'agit pas de composer des vitesses, mais de comparer des longueurs de trajet, quand la vitesse de la lumière reste, par définition, constante. Or il est évident que le trajet de la lumière dans le sens du déplacement de la tige est plus long que dans le sens inverse. Cela suffit pour montrer que les deux horloges ne sont plus synchrones pour les observateurs en mouvement qui observent les horloges au repos. On peut manifester cela de la façon suivante. Supposons que  $v = 1/10 c$ , avec  $c = 300.000 \text{ km/s}$ , alors

$$t_B - t_A = 1s \times 330.000 \times r_{AB} / 300.000$$

$$t'_A - t_B = 1s \times 270.000 \times r_{AB} / 300.000$$

et donc  $t_B - t_A > t'_A - t_B$

On voit que l'originalité d'Einstein dans sa présentation de la théorie de la relativité restreinte réside dans une fidélité rigoureuse à une méthode qui est à la fois opérationnelle et guidée par des principes. C'est cette méthode qui lui a permis de réformer profondément la physique classique, aussi bien pour

l'électromagnétisme qu'il simplifie, que pour la mécanique qu'il corrige et enrichit, à partir d'une cinématique qui est valable pour toute la physique et à l'intérieur de laquelle il parvient à déduire, dans la troisième section de sa Partie Cinématique, à l'aide seulement de ses deux postulats, les règles de transformation de Lorentz. Ces règles sont donc valables pour toute la physique, du moins quand elle est vue à partir de repères inertiels. Telle est la portée, immense, de la Relativité restreinte.

## 2 L'espace-temps courbe

Einstein pouvait-il être satisfait après avoir donné de telles bases à la Relativité restreinte? Certainement pas. Certes il avait montré qu'il était inutile et trompeur de chercher un substitut à l'espace absolu dont Newton avait fait le garant du principe d'inertie. Mais ce dernier principe n'était nullement mis en doute, au contraire. Comment pouvait-on lui donner un sens véritablement physique? Il fallait montrer d'abord comment il intervient dans les lois physiques fondamentales, en particulier dans la deuxième loi de Newton:  $F = m\gamma$ . On y voit qu'une force se manifeste par l'accélération conférée à une masse qui résiste. L'accélération est inversement proportionnelle à la masse; par conséquent l'inertie de la masse est elle-même une force de résistance, et l'on s'en aperçoit quand, dans une automobile qui freine, les corps des passagers se portent vers l'avant. L'inertie résiste au freinage. Les forces d'inertie, qu'on fait intervenir aussi dans les repères dits accélérés d'un mouvement de rotation uniforme, ne sont donc pas "fictives", comme on l'affirme volontiers, sous prétexte qu'il n'est pas facile d'en cerner la raison et que, par un jeu d'écriture, on peut en annuler les effets. Newton y avait vu la preuve d'un mouvement absolu par rapport à l'espace absolu (garant du principe d'inertie). Mais justement on a exclu cette solution. Si l'on pouvait rattacher, par contre, les forces d'inertie au principe d'inertie, alors le privilège des repères inertiels ne serait plus incompréhensible, et peut-être que les repères accélérés pourraient également tenir lieu de repères inertiels un peu particuliers, et être capables de décrire eux aussi les lois de la nature. On aurait généralisé le principe de relativité. Mais comment procéder ?

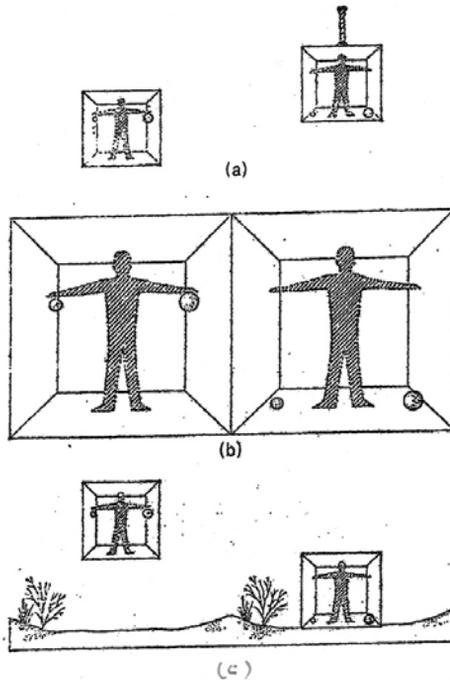
Einstein savait que Galilée avait montré que dans le vide tous les corps tombent également vite. C'est une indication précieuse qui relie la masse inerte (dont tout le monde sait qu'elle résiste) et la masse pesante (dont Newton a dit qu'elle attire).

Nous avons: Force = masse inerte \* accélération (1). Et aussi Force = masse pesante \* intensité du champ de gravitation (2). Si on utilise à la fois (1) et (2) on a: accélération = force / masse inerte et Force/masse inerte =

masse pesante/masse inerte \* intensité du champ de gravitation. Mais, depuis Galilée, masse pesante = masse inerte. Donc, accélération = intensité du champ gravitationnel

C'est une constatation que tout étudiant de physique peut faire, mais sur laquelle il convient de réfléchir. Einstein en a tiré "la réflexion la plus heureuse de sa vie", comme il l'a reconnu par la suite.

Cette réflexion se présente, au chapitre 20 de l'opuscule *La Théorie de la relativité restreinte et générale*, comme une expérience de pensée, qui est extrêmement suggestive. Einstein imagine une vaste portion d'espace si éloignée des étoiles qu'au sein de cette portion d'espace le principe d'inertie est rigoureusement valable. Dans cette portion d'étendue, il distingue un corps de référence, qu'il appelle un "ascenseur en chute libre" et que nous pouvons assimiler à une capsule spatiale, semblable à celle de nos cosmonautes : les observateurs qui s'y trouvent sont en état d'apesanteur. Dans cette capsule donc, les objets obéissent au principe d'inertie ; ils sont en repos ou en déplacement rectiligne et uniforme. Ce point est important car il montre qu'un repère en chute libre doit être assimilé à un repère inertiel. Einstein suppose alors "qu'au milieu extérieur du toit de la boîte soit fixé un crochet auquel est attachée une corde qu'un être quelconque commence à tirer avec une force constante". La boîte, pour un observateur galiléen extérieur, part vers le haut dans un mouvement qui ne cesse d'accélérer. Mais comment l'observateur, qui est enfermé dans sa capsule, juge-t-il l'événement? Pour lui, tout se passe comme s'il était soumis à un champ de gravitation qui l'attire vers le bas (cf. Figure 1) : s'il lâche une balle, elle tombe vers le sol, et n'importe quel autre corps tombe avec la même accélération.



**Figure 1** (extraite de Dennis W.Sciama, *les bases physiques de la relativité générale*, Dunod, 1971, p.46)

(a) Un homme dans une capsule située dans l'espace extérieur. La capsule est subitement tirée vers le haut par une corde. L'homme monte avec la capsule. En l'absence d'une telle accélération, les balles situées à proximité de ses mains restent où elles étaient.

(b) La même situation d'après le point de vue de l'homme. Il ressent une force d'inertie agissant vers le bas. Cette force agit également sur les balles et produit la même accélération bien qu'elles aient des masses différentes.

(c) Une situation différente qui semble la même pour l'homme. Il est d'abord en train de tomber vers un corps doué de pesanteur (à gauche), puis il parvient à la surface de ce corps et par conséquent au repos, tandis que les balles continuent à tomber avec la même accélération.

L'observateur, qui se trouve dans la boîte, peut donc se considérer comme étant soumis à un champ de gravitation dans un repère qui est, pour lui, "immobile". Nous sommes en présence sinon d'un repère inertiel à proprement parler, du moins d'un système qui s'en rapproche par son immobilité et à l'intérieur duquel nous avons de bonnes raisons d'appliquer le

principe de relativité, puisque tous les corps, qui y poursuivent leur course "librement", sont soumis à la même loi de pesanteur, quelle que soit leur nature. "C'est un argument puissant, remarque Einstein, en faveur d'un postulat de relativité générale". Si l'on pose ce postulat, à savoir que les systèmes accélérés ne sont rien d'autres que des systèmes inertiels soumis à un champ de gravitation, alors l'égalité de la masse inerte et de la masse pesante apparaît nécessaire, et nous pouvons en tirer d'autres conséquences intéressantes. Par exemple, nous pouvons en déduire qu'un corps qui effectue, par rapport à un repère inertiel, un mouvement rectiligne et uniforme, effectue dans un champ de gravitation un mouvement accéléré généralement curviligne (par exemple le mouvement de la Terre autour du Soleil). Nous pouvons aussi en déduire que "dans les champs de gravitation les rayons lumineux se propagent généralement en décrivant des trajectoires curvilignes". Or ceci est nouveau et semble mettre en cause le deuxième postulat de la Relativité restreinte, car maintenant la vitesse de la lumière varie avec le milieu qu'elle traverse. Einstein remarque que cela ne ruine pas du tout la validité de la Relativité restreinte, mais limite seulement cette validité, aux cas de l'usage de repères exempts d'un champ de gravitation, comme du reste elle se présente elle-même. En fait, on ne remarque pas, sur Terre, que les rayons lumineux qui viennent du Soleil sont courbés par le champ de gravitation de la Terre, mais en 1919, on remarqua, lors d'une éclipse du Soleil, que les rayons lumineux qui venaient d'une étoile, étaient effectivement courbés, puisqu'on voyait l'étoile, alors qu'elle aurait dû être cachée par le Soleil. Ce fut un argument puissant en faveur de la Relativité généralisée, dont la théorie avait été, entre temps, mise sur pied. La conséquence la plus importante qu'on peut tirer du postulat de relativité générale, qui assimile donc les repères accélérés quelconques à des repères inertiels soumis à un champ de gravitation, c'est qu'on devrait en tirer une *nouvelle théorie de la gravitation*. Cette théorie serait débarrassée de la notion d'"attraction" qui déplaisait tant aux cartésiens du XVII<sup>ème</sup> siècle, tels que Huyghens ou Leibniz, et qui, de plus, en postulant la simultanéité d'une action à distance, n'était plus recevable dans la nouvelle mécanique relativiste, où  $c$  est une vitesse-limite. L'espoir de cette nouvelle théorie de la gravitation accompagna Einstein de 1907, où il se rendit compte de la difficulté du problème, jusqu'en 1915, où il parvint à le résoudre.

Qu'est-ce qui montra à Einstein, en 1907, que le problème d'une définition nouvelle du champ de gravitation était effectivement difficile, s'il fallait assimiler, comme la théorie le proposait, les forces de gravitation à des forces d'inertie ? Une fois de plus il va être question du comportement des horloges et des règles de mesure, dont l'étude méthodique avait si bien servi

Einstein dans l'élaboration de la théorie de la Relativité restreinte. Prenons le cas du mouvement accéléré le plus simple, le mouvement de rotation uniforme, dont on a déjà parlé, et qui, à l'instar du mouvement d'inertie, se conserve de lui-même, comme le ferait le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même, s'il n'était pas freiné par les marées, c'est-à-dire par le champ de gravitation qui émane de la Lune. Soit donc un disque circulaire plat qui effectue un mouvement de rotation uniforme dans son plan autour de son centre. Imaginons un observateur assis sur le pourtour de ce disque. Pour un observateur galiléen extérieur au disque, cet observateur assis est soumis à une force centrifuge. Mais, d'après le principe de relativité générale, l'observateur assis sur la périphérie du disque, considère qu'il est immobile, et que la force qui agit sur lui est l'effet d'un champ de gravitation. Ce champ de gravitation est sans doute différent de celui de Newton, puisqu'il est nul au centre du disque et maximum à sa périphérie, mais comme l'observateur assis croit à la relativité générale, il n'en est pas troublé. Cependant cet observateur va être troublé par d'autres phénomènes. Pour mesurer le temps, il va placer des horloges au centre et à la périphérie du disque. C'est là que les difficultés vont commencer. Car, pour l'observateur galiléen qui voit les phénomènes de loin, l'horloge placée au centre ne se déplace pas, alors que l'horloge placée à la périphérie se déplace : d'après la Relativité restreinte, cette dernière horloge va plus lentement pour l'observateur galiléen immobile que celle placée au centre du disque. L'observateur assis sur le pourtour du disque doit faire la même constatation, si étonnante qu'elle soit pour lui. Il devra conclure que, bien que son repère soit pour lui immobile, *"sur notre disque et généralement dans tout champ de gravitation, une horloge marchera plus rapidement ou plus lentement suivant la position qu'elle occupe (au repos)"* Voilà qui complique singulièrement le problème de la synchronicité. Par ailleurs, la définition des coordonnées dans l'espace présente des difficultés semblables et, en apparence, "insurmontables". Si l'observateur en mouvement avec le disque pose sa règle de mesure tangentiellement à la périphérie de ce dernier, sa longueur sera, par rapport à l'observateur galiléen, inférieure à 1 (l'unité qu'elle représente), puisque, d'après la Relativité restreinte, les corps en mouvement apparaissent raccourcis dans la direction du mouvement. Si, au contraire, il pose sa règle dans la direction du rayon du disque, cette règle ne subit pas, par rapport à l'observateur galiléen, de raccourcissement. Donc, si l'observateur assis à la périphérie mesure d'abord la circonférence du disque, puis son diamètre avec la même règle, et divise ensuite, il ne trouve pas comme quotient le nombre connu  $\pi=3,14\dots$  mais un nombre supérieur. La géométrie d'un champ de gravitation n'est plus euclidienne! Il n'y a plus de ligne droite, plus de

coordonnées cartésiennes, donc plus de moyen usuel de s'assurer de l'identité ou de la non-identité des lois. La relativité générale apparaît un rêve irréalisable.

Et pourtant Einstein ne désespéra pas de parvenir au but qu'il s'était donné, à savoir de fournir une nouvelle théorie de la gravitation. Il y fut aidé par deux inventions mathématiques qui, pour leurs inventeurs eux-mêmes, étaient destinées à entraîner des conséquences en physique. La première lui fut fournie par son ancien professeur de mathématiques à Zurich, Hermann Minkowski. Même au plan de la théorie de la Relativité restreinte élémentaire, il est aisé de se rendre compte qu'un intervalle spatio-temporel entre deux événements reste le même, quel que soit le repère à partir duquel est mesuré cet intervalle, qui résulte de trois coordonnées spatiales et d'une mesure de temps combinée avec la vitesse de la lumière. En effet puisque les ondes lumineuses ont la même forme sphérique dans tous les repères inertiels qui les reçoivent, on peut écrire, en mesurant l'intervalle  $ct$  à partir de l'origine commune de ces repères, et en se bornant à l'intervalle infinitésimal  $ds$ ;

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$$

$$\text{et aussi } ds^2 = dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 - c^2 dt'^2$$

par une simple généralisation du théorème de Pythagore. Il est même possible, et plus élégant, comme Einstein l'avait remarqué dès son article de 1905, de dériver de ces deux égalités précédentes les transformations de Lorentz. On se trouve donc en face d'un nouvel invariant dans un espace-temps à quatre dimensions. Puisque c'est un invariant, on peut remplacer  $x, y, z, i$   $ct$ , par  $x_1, x_2, x_3, x_4$  et l'on obtient:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

qui est absolument indépendant du choix du repère de référence.

A partir d'une telle relation, il est loisible de voir qu'il n'y a plus de différence fondamentale entre l'espace et le temps, et que l'un se convertit partiellement dans l'autre d'un repère à l'autre. A partir de la définition que nous avons donnée du temps, cela ne doit pas nous surprendre. Mais cela suppose qu'on considère que la réalité physique ou, si l'on préfère, l'objectivité physique, est indépendante du choix du repère de référence à partir de laquelle elle est mesurée, et que le "*devenir*" qu'on observe en tout repère où l'on s'installe, fait place à "*l'être*" qui est étalé dans la

représentation. Après un peu d'hésitation, Einstein acquiesça à cette manière de voir, dont il pensa sans doute qu'elle pourrait l'aider à résoudre les problèmes redoutables de la relativité générale. Par là il s'écartait de son empirisme de départ, car si l'on "croit" en l'objectivité du "monde" de Minkowski, on ne peut plus être positiviste, au sens où l'on n'accepterait que des mesures effectivement réalisées et des constructions faites directement à partir d'elles. On se fie à l'exactitude d'un modèle qui figure la représentation des expériences, non l'expérience elle-même. Ernst Mach s'en aperçut et déclara répudier la nouvelle théorie relativiste qu'il avait d'abord bien accueillie. La position de Poincaré était plus délicate, dans la mesure où il était lui-même l'initiateur de cette représentation en espace-temps, que Minkowski lui avait empruntée. Cette représentation dérivait, pour Poincaré, du groupe des transformations de Lorentz, appelé depuis, conformément à la vérité historique, groupe de Lorentz-Poincaré. Mais Poincaré se contentait de dire que c'était un artifice mathématique qu'utilisait le physicien et se refusait à y voir une réalité physique.

Einstein avait certainement vu dans l'espace-temps de Minkowski une façon de se libérer de la tyrannie des mesures effectives qui, pour les problèmes qu'il se posait, ne le conduisaient à rien. D'autre part, son intérêt avait été attiré, on l'a vu, par les espaces non-euclidiens que semblaient requérir les champs de gravitation. C'est pourquoi il se mit à l'étude des surfaces de Gauss et des espaces de Riemann, et ce fut la deuxième contribution décisive que les mathématiques lui apportèrent. Les surfaces de Gauss ont ceci de particulier qu'à partir de courbes quelconques  $u, v$ , respectivement numérotées  $1, 2, 3, \dots$ , et tracées sur elles de telle sorte qu'elles se coupent, il est possible de traduire la distance entre deux points voisins  $P$  et  $P'$ . Si les coordonnées sont respectivement:

$$P : u, v$$

$$\text{et } P' : u+du, v+dv$$

alors leur distance s'exprime par la relation;  $ds^2 = g_{11} du^2 + 2 g_{12} du dv + g_{22} dv^2$  où  $g_{11}$ ,  $g_{12}$ ,  $g_{22}$  sont des grandeurs qui dépendent de  $u$  et de  $v$  d'une manière parfaitement déterminée (ce sont les composantes d'un *tenseur*). Ces considérations peuvent être généralisées à un espace à 3, 4, 5 dimensions. Pour l'espace-temps que nous voudrions traiter, c'est un espace de Riemann à 4 dimensions qui est susceptible de nous intéresser. Alors à chaque point de ce continuum, nous coordonnons arbitrairement quatre nombres  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , qu'on appelle "coordonnée gaussiennes"; à des

points voisins correspondent des valeurs voisines des coordonnées, comme dans les surfaces de Gauss. Si maintenant on coordonne aux points voisins P et P' une distance  $ds$ , qui est, écrit Einstein, "déterminable par des mesures et physiquement bien définie" (à condition, bien sûr, qu'on sache mettre en relation ces mesures et le modèle dont on traite), on a la formule:

$$ds^2 = g_{11} dx_1^2 + 2 g_{12} dx_1 dx_2 + \dots + g_{44} dx_4^2$$

Einstein pouvait aussi tirer parti du fait que la représentation de Gauss pour le  $ds^2$  ainsi déterminé n'est possible que dans le cas où des domaines suffisamment petits du continuum considéré peuvent être regardés comme des continua euclidiens (dans ce cas le  $ds^2$  s'exprime dans le monde de Minkowski et la relativité restreinte garde sa validité).

En raison de ces relations proprement constitutives entre la géométrie euclidienne et la géométrie riemannienne, Einstein obtenait deux résultats, dont le premier a permis l'obtention du second. Le premier résultat c'est une définition de la Relativité générale: "Les équations doivent se transformer en équations de même forme (pour l'expression des lois) quand on opère *des substitutions quelconques* des variables de Gauss  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , car toute transformation (non seulement la transformation de Lorentz) correspond au passage d'un système de coordonnées de Gauss à un autre"; cela exige seulement qu'on abandonne l'idée de "corps de référence" pour l'idée d'un "mollusque de référence", où les coordonnées d'espace et de temps changent non de repère en repère mais de point à point (pourvu que les valeurs de coordonnées voisines soient elles-mêmes suffisamment voisines) et où les lois doivent s'exprimer sous la forme tensorielle. Le deuxième résultat c'est l'expression de la nouvelle loi de gravitation précisément sous une forme tensorielle. A partir de la possibilité de représenter le potentiel d'un champ de gravitation quelconque par le tenseur  $g_{\mu\nu}(x)$  qui détermine la distance entre deux points infiniment voisins d'une ligne d'univers (ligne qui représente la trajectoire d'un objet dans l'espace-temps), Einstein est parvenu à établir l'équation du champ de gravitation, où la géométrie spatio-temporelle obéit à la prégnance des masses-énergies. C'est le deuxième exploit qu'a réalisé Einstein, un exploit dont personne ne peut lui refuser la paternité, même s'il s'est fait aider par des mathématiciens (Grossmann et même Hilbert qui faillit le devancer), et qui a fait de lui le Newton du XXème siècle.

### 3 L'espace cosmique et le temps cosmique

En quoi consiste donc son troisième exploit? Tout simplement dans l'application de la théorie relativiste de la gravitation au problème cosmologique dans son ensemble. Ce problème est le problème le plus ancien de la physique, un problème qu'elle a hérité de la pensée mythologique, et qui l'a mise à rude épreuve : comment se représenter l'Univers dans son ensemble? Toute théorie de la gravitation rencontre ce problème, puisque seuls les champs de gravitation s'étendent à l'infini, et qu'on ne peut imaginer, jusqu'à preuve du contraire, d'autres liens entre les étoiles et les galaxies.

Or on ne peut pas dire que la théorie newtonienne de la gravitation résolvait avec élégance ce problème. Einstein le savait fort bien, et il en fait état dans son livre populaire paru en 1917 : la théorie de Newton exige que toute la masse de matière soit concentrée autour de son centre, ce qui entraînerait que l'intensité du champ de gravitation croîtrait indéfiniment avec le rayon  $R$  d'une sphère de matière prise dans cette masse, mais cette conséquence est contradictoire avec ses prémisses. Les théoriciens, comme Seeliger, ne pouvaient échapper à ces conséquences désastreuses qu'en modifiant la loi de gravitation de Newton pour les masses très éloignées les unes des autres; c'était la preuve de la faiblesse de la théorie.

Einstein, quant à lui, ne pouvait appliquer sa théorie de la gravitation à l'Univers qu'en faisant des hypothèses supplémentaires, à savoir que les galaxies formaient un gaz homogène et isotrope, comme le suggère l'observation. Mais lui aussi se heurtait à des potentiels de gravitation croissant à l'infini, ce qu'il ne pouvait éviter qu'en posant des "conditions aux limites" peu conformes à sa propre théorie. C'est alors qu'il eut ce coup de génie, où l'on peut voir son troisième exploit, et qui s'exprime dans la proposition suivante, où le temps se sépare de l'espace : "S'il était possible de considérer le monde comme un continuum fermé *selon ses dimensions spatiales* (souligné dans le texte), alors aucune condition aux limites de cette sorte ne serait nécessaire". Donc l'espace est fermé et, pour Einstein, hypersphérique (à trois dimensions), mais le temps est ouvert, s'étendant, pour lui, indéfiniment dans le passé et dans l'avenir. Pour cette raison, on a appelé cet univers "cylindrique". Cependant Einstein n'a pu obtenir ce modèle d'univers qu'en introduisant une constante cosmologique  $\Lambda$ , qui est tout à fait compatible avec la Relativité générale, mais dont l'introduction paraissait à l'époque un peu *ad hoc*.

Car, dès 1922, le météorologiste russe Friedmann devait montrer qu'il n'y a pas de solution statique (pour l'espace) des équations de la Relativité

générale quand on les applique à l'Univers avec les postulats d'Einstein (sans la constante cosmologique). Simplement il faut distinguer divers types d'univers selon leur courbure spatiale, qui dépend de la masse totale de l'Univers et qui détermine leur destin temporel (bien que leur courbure soit elle-même fonction du "temps cosmique" puisqu'elle change avec le temps (cf. Figure 2). Einstein se rallia à cette façon de voir et proposa même, avec de Sitter, en 1932, un modèle, dit d'Einstein-de Sitter, où la courbure est nulle et l'espace euclidien (cf. Figure 2).

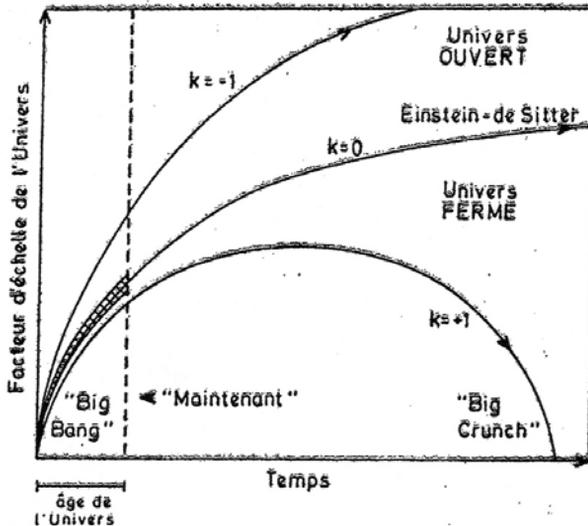


Figure 2 (extraite de Jacques Demaret, *Univers, les théories de la cosmologie contemporaine*, Le Mail, 1991, p.47).

Les modèles cosmologiques spatialement homogènes et isotropes sans constante cosmologique peuvent être classés, du point de vue de l'évolution temporelle de leur taille, en deux grands types: d'une part, ceux pour lesquels l'expansion est perpétuelle, c'est-à-dire les modèles de géométrie spatiale ouverte (caractérisée par un paramètre de courbure  $k = -1$ ) et ceux de géométrie spatiale plane, c'est-à-dire les modèles d'Einstein - de Sitter ( $k = 0$ ) et, d'autre part, ceux de géométrie spatiale sphérique, pour lesquels l'expansion se ralentit, s'arrête et est suivie d'une phase de contraction symétrique ( $k = 1$ ). Diverses observations suggèrent que l'Univers actuel se situe dans la zone hachurée, à cheval sur la courbe  $k = 0$ , mais très proche de cette courbe, ( donc d'un modèle d'Einstein - de Sitter. (Légende de J.Demaret).

De nos jours, la cosmologie s'est beaucoup enrichie, mais les classifications des modèles, proposée par Friedmann, est restée. Presque tous les modèles rentrent dans cette classification qui sépare le temps de l'espace, et donne droit au phénomène de l'expansion, que le chanoine Lemaître, le premier (en 1927), reconnut comme la bonne explication du décalage vers le rouge du spectre des galaxies, en fonction de leur distance. Lemaître proposa aussi "l'atome primitif", de nature quantique, comme état premier de l'Univers, avant le commencement de l'expansion, qui reçut le nom de Big Bang. On peut parler d'une histoire de l'Univers et l'on reconstitue, grossièrement au moins, ses premières phases (cf. Figure 3).

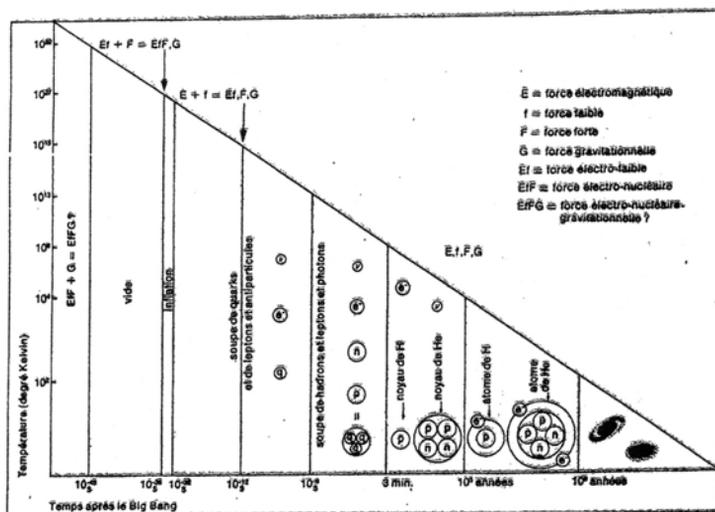


Figure 3 (extraite de "La Recherche", 1984, N° 151, dans l'article de Trinh Xuan Thuan)

Dans le passé, l'Univers était très dense et très chaud; un univers soumis à une expansion, d'où dilution et refroidissement. La physique connue ne permet pas d'extrapoler au-delà de  $10^{-43}$  s; c'est peut-être alors que les quatre forces fondamentales dans la nature s'unissent en une seule et même force. Vers 3 min, la nucléosynthèse primordiale des noyaux d'hydrogène et d'hélium est terminée. Vers 100.000 ans, la recombinaison des électrons aux noyaux devient possible; la formation des atomes H et He s'accompagne de l'émission du rayonnement cosmique que nous observons maintenant refroidi à 2,7 K. (Légende de Agnès Acker, professeur d'astrophysique à l'ULP (Strasbourg), dans "L'Astronomie", avril 1989, p.153)

Tout ce travail cosmologique dérive de l'intuition d'Einstein, qui sépara le temps de l'espace, malgré la Relativité qui les associait intimement, et c'est pourquoi cette séparation apparaît comme son troisième exploit.

## Conclusion

Rien n'obligeait Einstein à passer du premier exploit au second, et du second au troisième. A chaque fois le physicien, sans renier ses acquis, a dû modifier ses conceptions de l'espace et du temps. Il lui fallut d'abord accepter le monde de Minkowski, qui s'élevait au-dessus des procédés opératoires dont il s'était servi, avec une parfaite maîtrise, jusque là. Il lui fallut ensuite accepter les modèles d'univers de Friedmann, qui s'élevaient au-dessus du bloc spatio-temporel à partir duquel la Relativité générale avait pu être obtenue. Quand Einstein retrouve le caractère original du temps en cosmologie, il ne s'y applique pas entièrement, du reste, car il est absorbé alors par une autre tâche, à savoir la théorie du champ unitaire. On peut regretter d'ailleurs qu'Einstein n'ait pas soupçonné que la physique quantique pouvait être plus prometteuse que la Relativité, à laquelle il s'accrochait, pour résoudre le problème de l'unification des forces ou interactions. La solution de ce problème devrait apporter, par surcroît, des lumières indispensables sur le commencement et la genèse de l'Univers. Ces avancées, qui sont encore en marche, Einstein ne pouvait les concevoir, et il serait déplacé de déplorer cette situation, comme de demander à un créateur de dépasser continuellement ses propres créations. Cependant quand les créations sont de la taille de celles d'Einstein, même les penseurs évolutionnistes qui ne partagent pas une physique qui envisage les choses, *sub specie aeternitatis*, comme il y avait été lui-même conduit, doivent beaucoup à Einstein, puisqu'ils lui empruntent le fondement même de leur entreprise, à savoir la notion de "temps cosmique".

## Références

### Sources :

- [1] J. Becquerel, Exposé élémentaire de la Théorie d'Einstein, Paris, Payot, 1922
- [2] O. Costa de Beauregard, La notion de temps, équivalence avec l'espace, Paris, Hermann, 1963
- [3] A. Einstein, Réflexions sur l'électrodynamique, l'éther, la géométrie et la relativité, Paris, Gauthier-Vilars, édit. 1972

- [4] A. Einstein, La Relativité, trad. Maurice Solovine, Paris, Payot, 1956
- [5] A. Einstein, Kosmologische Betrachtungen zur allmemeine Relativitätstheorie, in Sitzungberichte der königlichen prussischen Akademie der Wissenschaften, 1917, VI, 142-152
- [6] J. Leite Lopes, Théorie relativiste de la gravitation : une introduction , Lecture Series -DEA , ULP, Strasbourg 1992

***Etudes :***

- [7] H. Barreau, "les théories philosophiques de la connaissance face à la relativité d'Einstein", in L'espace perdu et le temps retrouvé, s. l. d. d'Edgar Morin et de Rémy Lestienne, Communications, 41, 1985/Seuil, 95-110
- [8] J. Demaret, Univers, les théories de la cosmologie contemporaine, Aix-en-Provence, le Mail, 1991
- [9] M. Paty, Einstein philosophe, Paris, PUF, 1993
- [10] M. A. Tonnelat, Histoire du Principe de Relativité, Paris, Flammarion, 1971