

La constante cosmologique de 1917 à 1933 et le rôle des problèmes conceptuels

Lucas Gautheron

Janvier 2022

Introduction

Depuis son introduction par Einstein (1879-1955) en 1917, jusqu'à la stabilisation de son rôle et de sa valeur à la fin des années 1990 grâce aux mesures de distances de luminosité des supernovae thermonucléaires, la constante cosmologique a été mobilisée dans des buts très différents. Chez Einstein, elle fut nécessaire à l'aboutissement du principe de relativité de l'inertie, jusqu'à ce que la découverte de l'expansion de l'univers la rende définitivement caduque à ses yeux. Chez Eddington (1882-1944), la constante cosmologique était au contraire indispensable pour expliquer l'expansion de l'univers. Une telle variation synchronique et diachronique pose question. Comment expliquer des attitudes si différentes face à un même objet de la théorie ? Comment les réconcilier avec une vision normative rationaliste de la conduite scientifique ?

Afin de répondre à ces questions, nous étudierons la genèse de la constante cosmologique (introduite en 1917) puis son abandon progressif par Einstein au début des années 1930. Nous mobiliserons à cette fin le cadre théorique proposé par Laudan qui suggère que la science progresse par la résolution de problèmes empiriques et conceptuels. Nous montrerons que la diversité des rapports à la constante cosmologique a pour origine les projets philosophiques ou métaphysiques poursuivis par les différents acteurs, qui déterminent la manière dont ceux-ci avancent et priorisent certains problèmes. Nous montrerons enfin que les différentes attitudes d'Einstein face à la constante cosmologique peuvent être comprises rationnellement dans le cadre théorique proposé par Laudan, alors qu'elles seraient plus difficilement conciliables avec les idées de Kuhn et Lakatos.

La partie 1 démontre le rôle heuristique fondamental du principe de Mach pour Einstein dans le développement de sa théorie de la relativité générale. La partie 2 développe la manière dont son implémentation dans la théorie de la relativité générale a abouti à la formulation d'un problème de conditions aux limites. La partie 3 montre comment la tentative de résolution de ce problème a conduit au premier modèle d'univers d'Einstein en 1917 et à l'introduction de la constante cosmologique. La partie 4 rend compte du modèle d'univers alternatif de de Sitter et des problèmes que celui-ci posait pour Einstein. La partie 5 développe les raisons qui ont conduit Einstein à renoncer à la constante cosmologique et à proposer un nouveau modèle d'univers en 1931. En contraste, la partie 6 propose de comprendre les raisons qui ont conduit Eddington à la maintenir. Enfin, une interprétation de ce récit en terme des concepts Laudaniens de problèmes et de traditions de recherche est proposée en partie 7.

1 Le principe de Mach comme principe directeur

L'idée qui sera développée dans cette partie est que le "principe de Mach" a joué un rôle important dans la construction de la théorie de la relativité générale par Einstein, et l'a conduit à formuler les questions qui ont débouché sur son modèle cosmologique de 1917 dans son article "Cosmological

Considerations in the General Theory of Relativity” (Einstein, 1917). C’est en effet l’importance de ce principe directeur qui a poussé Einstein à mettre en avant certains problèmes, dont ses tentatives de résolution ont conduit à l’introduction d’un nouveau paramètre dans ses équations, à savoir la constante cosmologique. Cette idée du rôle majeur du principe de Mach dans la construction du premier modèle d’univers d’Einstein est soutenue de façon convaincante par de nombreux auteurs, parmi lesquels Kerszberg (1989, pp. 83, 99, 103), Barbour (1990), Hoefer (1994), et plus récemment, Smeenk (2014) et O’Raifeartaigh et al. (2017, 2018), et nous nous appuyons sur leurs travaux, en prenant soin toutefois d’examiner les sources primaires (publications et correspondances).

C’est à Einstein lui-même que l’on doit le terme de Principe de Mach (Barbour, 1990, p. 47), qu’il introduit pour la première fois dans son article “À propos des fondements de la théorie générale de la relativité” (Einstein, 1918). Dans cet article, Einstein résume les fondements de sa théorie à trois principes : le principe de relativité, le principe d’équivalence, et le principe de Mach, qu’il définit comme “une généralisation de l’idée d’Ernst Mach selon laquelle l’inertie doit se déduire des interactions entre les corps”. Pour Einstein, l’inertie d’un corps (i.e. sa résistance à l’accélération) devrait être réductible à ses interactions avec l’ensemble des corps de l’univers, sans recourir à une propriété de l’espace lui-même : autrement dit, l’inertie doit pouvoir se déduire de la distribution de masses de l’univers. Bien qu’Einstein n’ait introduit l’expression “principe de Mach” qu’en 1918, selon Hoefer (1994), cette idée était déjà explicitement présente dans ses écrits depuis au moins 1912 (p. 289). Dès cette année, dans son article “Is There a Gravitational Effect Which Is Analogous to Electrodynamical Induction?”, citant Mach, Einstein écrit en effet : « Cela suggère que l’intégralité de l’inertie d’une masse ponctuelle est un effet de la présence de toutes les autres masses, qui est fondé sur une sorte d’interaction avec ces dernières. ¹ » (Einstein, 1912). À partir de 1913, il nomme ce principe “principe de relativité de l’inertie” (Hoefer, 1994, p. 6).

Pour Hoefer, qui s’appuie notamment sur la correspondance entre Einstein et de Sitter, il ne fait aucun doute que ces idées ont joué un rôle moteur majeur dans l’édification de la relativité générale :

« Le poids des productions dans les années 1913-1914 dans lesquelles Einstein discute et défend les idées de Mach montre clairement l’importance que le désir de rendre l’inertie relative a joué dans son travail sur cette période. [...] selon la description d’Einstein lui-même, ses objectifs Machiens sont peut-être la seule chose qui l’a poussé à continuer de travailler sur sa théorie de la relativité générale, en regard de son échec à obtenir ce qu’il recherchait, à savoir des équations du champ généralement covariantes ² » (Hoefer 1994, p. 303)

Un exposé des fondements philosophiques de cet attachement d’Einstein au principe de relativité de l’inertie est proposé par Kerszberg (1989, pp. 102-119). Selon lui, une telle démarche s’inscrit dans une filiation Leibnizienne (p. 103) dont Einstein emprunte lui-même des concepts, par exemple en mobilisant explicitement le principe de raison suffisante dans ses réflexions sur la relativité de l’inertie (p. 104). Kerszberg replace ainsi les réflexions d’Einstein dans le prolongement des discussions entre Leibniz et le disciple de Newton Samuel Clarke, le premier cherchant à réfuter le concept d’espace et de mouvement absolus, le second opposant la discernabilité d’un état de rotation absolu par l’existence de forces centrifuges, une difficulté que Leibniz dut bien concéder (pp. 103-104). Kerszberg résume ainsi la distinction qui sépare la vision Leibnizienne révisée de la vision Newtonienne : « Les forces d’inertie (telles que les forces centrifuges) sont la *cause* plutôt que l’effet du mouvement dans

1. Trad. de l’anglais : “This suggests that the entire inertia of a mass point is an effect of the presence of all other masses, which is based on a kind of interaction with the latter.”

2. Trad. de l’anglais : “The weight of material from 1913-1914 in which Einstein discusses and advocates Mach’s ideas shows clearly what an important role the desire to relativize inertia played in Einstein’s work in this period. [...] : by Einstein’s own description, the Machian goals may have been the only thing that kept Einstein working on a general theory of relativity, in the face of his early failure to find what he expected, generally covariant field equations”

l'espace³ » (p. 85). Ainsi, pour lui, la résolution de cette contradiction trouve un aboutissement dans les idées de Mach, qui propose notamment d'attribuer les forces centrifuges aux effets des étoiles fixes (p. 105-106). Kerszberg (1989, pp. 112-113) rend le lien avec Einstein très transparent en s'appuyant notamment sur des conférences données par Einstein à Princeton en 1921, au cours d'une desquelles celui-ci précise la valeur du principe de causalité :

« Aucune réponse ne peut-être admise comme épistémologiquement satisfaisante, à moins que la raison donnée soit un *fait expérimentalement observable*. Le principe de causalité n'a pas la valeur d'un énoncé sur le monde de l'expérience, à moins que des faits observables apparaissent finalement en tant que causes et en tant qu'effets. ⁴ » (Einstein 1921)

Une telle description nous éclaire sur les fondements philosophiques qui motivent Einstein : le principe de relativité de l'inertie découle d'un effort qui vise à ne conférer une ontologie et un pouvoir causal qu'aux masses pondérables, tout en refusant cette capacité causale à l'espace lui-même.

Pour autant, d'après Hoefer (1994), Einstein était conscient que sa théorie de 1915, qui satisfaisait le principe de covariance générale, ne réalisaient pas pleinement le principe de Mach (Hoefer, 1994, p. 304). Le noeud du problème apparaît par exemple dans la solution proposée par Schwarzschild pour la métrique autour d'une masse statique de symétrie sphérique. Schwarzschild, dans son calcul, recourt à une hypothèse supplémentaire, à savoir que le tenseur métrique $g_{\mu\nu}$ doit tendre vers le tenseur de Minkowski ($\eta_{\mu\nu}$) lorsque la distance à la masse centrale tend vers l'infini (O'Riartaigh et al., 2017). En coordonnées sphériques, centrées autour d'une masse statique M plongée dans le vide, on a en effet (Hoefer, 1994, p. 308) :

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} r^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin^2 \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1 - 2GM/rc^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(1 - 2GM/rc^2) \end{pmatrix} \xrightarrow{r \rightarrow \infty} \begin{pmatrix} r^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin^2 \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Cette limite est bien équivalente au tenseur de Minkowski (= diag(1, 1, 1, -1)) par transformation en coordonnées cartésiennes.

Le tenseur de Minkowski est en effet une solution de l'équation d'Einstein dans le vide – en l'absence de masse –, i.e. pour $T_{\mu\nu} = 0$. Mais par ailleurs, le tenseur de Minkowski *implique* une structure inertielle. Autrement dit, la métrique de Minkowski confère une structure inertielle à l'espace en l'absence de matière, ce qui est en contradiction flagrante avec le principe de Mach selon lequel l'inertie résulte de la matière. Il fallait donc exclure une telle solution du vide à l'équation d'Einstein (Hoefer, 1994, p. 304). Ainsi, en réponse à la solution de Schwarzschild, Einstein soutient le rôle constitutif de la matière pour l'espace :

« Finalement, selon ma théorie, l'inertie est simplement une interaction entre masses, pas un effet dans lequel l'«espace» en lui-même est impliqué, indépendamment de la masse observée. L'essence de ma théorie est précisément qu'aucune propriété ne peut être attribuée indépendamment à l'espace lui-même. Si toute chose devait disparaître du monde, alors selon Newton, l'espace inertiel Galiléen demeure ; selon ma propre interprétation, en revanche, rien ne subsiste. ⁵ » (Einstein 1916a)

3. Trad. de l'anglais : “*Inertial forces (such as centrifugal forces) are the cause rather than the effect of motion in space*”

4. Trad. de l'anglais : “*No answer can be admitted as epistemologically satisfactory, unless the reason given is an observable fact of experience. The law of causality has not the significance of a statement as to the world of experience, except when observable facts ultimately appear as causes and effects.*”

5. Trad. de l'anglais : “*Ultimately, according to my theory, inertia is simply an interaction between masses, not an effect in which “space” of itself were involved, separate from the observed mass. The essence of my theory is precisely*

Le problème se cristallise ensuite pour Einstein autour de la recherche de conditions aux limites conformes au principe de Mach, comme le montre une lettre qu'il adresse à Michele Besso en mai 1916 :

« En ce qui concerne la gravité, je suis actuellement à la recherche de conditions aux bords à l'infini ; il est très intéressant de se demander s'il peut exister un monde fini, c'est-à-dire un monde d'étendue finie selon la mesure naturelle, dans lequel la totalité de l'inertie est relative. ⁶ » (Einstein 1916b)

C'est ce travail qui aboutira en 1917 au modèle cosmologique d'Einstein, au terme de plusieurs difficultés qui nous sont révélées par sa correspondance avec de Sitter, comme nous le verrons dans la partie suivante.

2 Le problème des conditions aux limites

Dans une lettre adressée à de Sitter en 1916, Einstein relève que, selon la portion de l'univers considérée, la part de l'inertie due à la masse qu'elle contient et celle découlant des conditions aux limites varient :

« Je dois toujours décrire une certaine portion de l'univers. Dans cette portion, les $g_{\mu\nu}$ (tout comme l'inertie) sont déterminées par les masses présentes dans la portion de l'espace considérée et par les $g_{\mu\nu}$ à ses bords. ⁷ » (Einstein 1916c)

La question est alors de savoir, comment assurer que l'effet d'inertie ne provienne que de la masse contenue dans le système considéré, sans être imposé par le choix des conditions aux limites, i.e. de la valeur de $g_{\mu\nu}$ à l'extérieur du système ? C'est en effet ainsi qu'Einstein lui-même formule le problème : « Puis-je imaginer qu'un (ou le) monde soit tel que l'inertie provienne uniquement des masses, et pas du tout des conditions aux limites ? ⁸ » (*ibid.*).

Par ailleurs, cette lettre révèle indirectement que de Sitter était sceptique quant à l'intérêt d'un tel projet, et qu'Einstein en était bien conscient : « Je suis désolé d'avoir autant insisté sur le problème des conditions aux bords dans nos discussions. ⁹ »

Dans son article “On Einstein's Theory of Gravitation and its Astronomical Consequences. Second Paper” de 1916, Willem de Sitter nous renseigne sur le chemin alors parcouru par Einstein :

« Nous pourrions uniquement dire que l'intégralité de $g_{\mu\nu}$ est d'origine matérielle si ses valeurs à l'infini étaient les mêmes dans tous les systèmes de coordonnées. Les valeurs [de Minkowski] ne sont certainement pas invariantes. ¹⁰ » (de Sitter 1916)

Dans ce même article, de Sitter ajoute que selon Einstein ¹¹, une telle exigence conduit aux conditions aux limites suivantes, qu'il nomme “valeurs naturelles” (*natural values*) (de Sitter, 1916) :

that no independent properties are attributed to space on its own. It can be put jokingly this way. If I allow all things to vanish from the world, then following Newton, the Galilean inertial space remains ; following my interpretation, however, nothing remains.”

6. Trad. de l'anglais : “In gravitation, I'm now searching for the boundary conditions at infinity ; it's quite interesting to consider, whether there can be a finite world, that is, a world of finite extension in natural measure, in which truly all inertia is relative”

7. Trad. de l'anglais : “I always have to describe a certain portion of the universe. In this portion the $g_{\mu\nu}$'s (as well as the inertia) are determined by the masses present in the observed portion of space and by the $g_{\mu\nu}$'s at the boundary. Which part of the inertia stems from the masses and which part from the boundary conditions depends on the choice of the boundary.”

8. Trad. de l'anglais : “Can I imagine a (or the) world to be such that the inertia comes solely from the masses, and not at all from the boundary conditions ?”

9. Trad. de l'anglais : “I am sorry for having placed too much emphasis on the boundary conditions problem in our discussions.”

10. Trad. de l'anglais : “Evidentially we could only say that the whole of the $g_{\mu\nu}$ is of material origin [the boundary] values at infinity were the same for all systems of co-ordinates [...] The [Minkowski] values are certainly not invariant”

11. De Sitter relate ainsi une conversation avec Einstein ayant eu lieu le 29 septembre 1916 (Kerszberg, 1989, p. 130)

$$g_{\mu\nu} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \infty \\ 0 & 0 & 0 & \infty \\ 0 & 0 & 0 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Reste à démontrer pourquoi, dans ce cas, tout se passe localement comme si les bonnes conditions aux limites sont données par la métrique de Minkowski :

« Il est maintenant certain que, dans un grand nombre de référentiels (i.e., dans tous les référentiels galiléens), très loin des corps matériels, $g_{\mu\nu}$ prend les valeurs [de Minkowski].¹² » (de Sitter 1916)

Selon l’hypothèse d’Einstein, ces valeurs sont particulières et doivent être produites par des corps matériels. Par conséquent il doit exister, à des distances encore plus lointaines, des masses inconnues qui sont la source des valeurs [de Minkowski], i.e., de l’intégralité de l’inertie.

Une telle idée ne plaît pas à de Sitter, comme il l’exprime dans ce même article :

« Nous devons insister sur le fait qu’il est impossible que n’importe lesquelles des étoiles fixes ou nébuleuses puissent faire partie de ces masses hypothétiques [...] Si nous croyons en l’existence de ces masses supernaturelles, qui contrôlent l’ensemble de l’univers physique sans avoir jamais été observées, alors la tentation est grande en effet de préférer un système de coordonnées par rapport auquel elles sont au repos, et le distinguer par un nom différent, tel que “système inertiel” ou “éther”. Formellement le principe de relativité resterait vrai, mais en réalité nous en serions revenus à l’espace absolu sous un autre nom.¹³ » (de Sitter 1916)

Un tel problème amènera quelques mois plus tard Einstein à proposer un univers sphérique, hypothèse qui le débarrasse du problème des conditions aux limites “Machiennes”, et qui le conduit à l’introduction de la constante cosmologique.

3 L’univers d’Einstein

C’est en février 1917 qu’Einstein introduit un modèle d’univers faisant appel à la constante cosmologique, dans son article “Cosmological Considerations in the General Theory of Relativity” (Einstein, 1917). Dans cet article, Einstein rappelle son attachement au principe de relativité de l’inertie (c’est-à-dire au principe de Mach), et son rôle primordial dans la formulation du problème des conditions aux limites :

« L’opinion que j’ai considérée depuis récemment, en ce qui concerne les conditions aux limites à imposer à l’infini, a pour bases les considérations suivantes. Dans une théorie cohérente de la relativité, il ne peut y avoir d’inertie relative à l’“espace”, mais seulement une inertie de masses relative entre elles [notre emphase]. Ainsi, si une masse

12. Trad. de l’anglais : “Now it is certain that, in many systems of reference (i.e., in all Galilean systems) the $g_{\mu\nu}$ at large distances from all material bodies known to us actually have the [Minkowski] values. On Einstein’s hypothesis, these are special values which, since they differ from [natural] values, must be produced by some material bodies. Consequently there must exist, at still larger distances, certain unknown masses which are the source of the [Minkowski] values, i.e., of all inertia.”

13. Trad. de l’anglais : “We must insist on the impossibility that any of the known fixed stars or nebulae can form part of these hypothetical masses [...] If we believe in the existence of these supernatural masses, which control the whole physical universe without having ever being observed then the temptation must be very great indeed to give preference to a system of co-ordinates relatively to which they are at rest, and to distinguish it by a special name, such as “inertial system” or “ether”. Formally the principle of relativity would remain true, but as a matter of fact we would have returned to the absolute space under another name.”

se trouve à une distance suffisamment grande de toutes les autres masses de l'univers, son inertie doit tendre vers zéro. Nous allons tenter de formuler cette condition mathématiquement.¹⁴ » (Einstein 1917)

La formulation qu'il propose suppose un univers anisotrope ; dans ce cas, le tenseur métrique est donné par :

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -A(dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2) + Bdx_4^2 \quad (3)$$

Il montre que dès lors, l'inertie d'une particule est donnée par mA/\sqrt{B} . Pour que cette inertie soit nulle à l'infini, loin de toute masse (conformément au principe de Mach), il faut selon Einstein que $A \rightarrow 0$ et $\sqrt{B} \rightarrow \infty$. Mais \sqrt{B} est aussi une mesure de l'énergie potentielle ; or requérir que celle-ci tende à l'infini est, selon Einstein, contraire aux observations astronomiques de l'époque (« Le fait des petites vitesses des étoiles¹⁵ »).

Face à cette difficulté, Einstein évoque deux voies de sorties auxquelles il ne peut se résoudre. La première est d'imposer une condition aux limites qui tende vers la métrique de Minkowski. Il rejette cette possibilité au nom du principe de relativité de l'inertie :

« [...] si nous adoptons ce point de vue, nous échouons à satisfaire le critère de la relativité de l'inertie. En effet, l'inertie d'une masse ponctuelle m (en mesure naturelle) dépend uniquement de $g_{\mu\nu}$; mais ses valeurs diffèrent de peu des valeurs postulées, telles que ci-dessus, à l'infini. Ainsi l'inertie serait en effet influencée, mais ne serait pas conditionnée par la matière (présente dans cet espace fini). Si seul une masse ponctuelle était présente, selon ce point de vue, il posséderait une inertie, et en réalité une inertie presque aussi grande que quand elle était entourée des autres masses de l'univers.¹⁶ » (Einstein 1917)

La seconde alternative qu'Einstein écarte est la voie qu'il prête à de Sitter, et qui consisterait à renoncer à proposer de telles conditions générales : « Je dois confesser qu'une telle résignation aussi totale face à cette question fondamentale est pour moi difficile¹⁷ » . Il propose enfin une troisième alternative, en introduisant son modèle d'Univers : « L'univers spatialement fini avec une distribution uniforme de matière¹⁸ » .

Dans la construction de ce modèle, Einstein fait d'abord l'hypothèse que la densité de matière est relativement uniforme, par analogie avec l'approximation qui consiste à assimiler la Terre à une ellipsoïde, malgré la complexité de sa surface. En outre, la faible vitesse des étoiles (par rapport à la vitesse de la lumière) justifie, pour Einstein, de travailler dans un hypothétique référentiel dans lequel la matière est presque au repos : « Il existe un référentiel par rapport auquel la matière peut-être considérée comme toujours au repos¹⁹ » . Il ajoute à cela une hypothèse particulièrement importante : le système doit être statique (« comme toujours avec les problèmes statiques, nous avons...²⁰ »). Il déduit du reste que la courbure d'un tel espace R doit être constante, ce qu'il associe

14. Trad. de l'anglais : “The opinion which I entertained until recently, as to the limiting conditions to be laid down in spatial infinity, took its stand on the following considerations. In a consistent theory of relativity, there can be no inertia relative to “space”, but only an inertia of masses relative to one another. If, therefore, I have a mass at a sufficient distance from all other masses in the universe, its inertia must fall to zero. We will try to formulate this condition mathematically”

15. Trad. de l'anglais : “The fact of the small velocities of the stars”

16. Trad. de l'anglais : “[...] if we adopt this view, we fail to comply with the requirement of the relativity of inertia. For the inertia of a material point of mass m (in natural measure) depends upon the $g_{\mu\nu}$; but these differ but little from their postulated values, as given above, for spatial infinity. Thus inertia would indeed be influenced, but would not be conditioned by matter (present in finite space). If only one single point of mass were present, according to this view, it would possess inertia, and in fact an inertia almost as great as when it is surrounded by the other masses of the actual universe.”

17. Trad. de l'anglais : “I must confess that such a complete resignation in this fundamental question is for me a difficult thing”

18. Trad. de l'anglais : “The Spatially Finite Universe with a Uniform Distribution of Matter”

19. Trad. de l'anglais : “There is a system of reference relatively to which matter may be looked upon as being permanently at rest”

20. Trad. de l'anglais : “as always with static problems, we shall have...”

à une géométrie sphérique, analogue à une sphère à trois dimensions embarquée dans un espace de dimension 4. Einstein note que toutes ces hypothèses fixent à la fois le tenseur métrique $g_{\mu\nu}$ et le tenseur énergie-impulsion $T_{\mu\nu}$. Cependant, en l'état, il relève aussi que les équations d'Einstein n'admettent pas une telle combinaison :

« Le système d'équations (13) [les équations d'Einstein] ne sont en aucun cas satisfaites lorsque nous insérons les valeurs de $g_{\mu\nu}$ données en (7), (8) et (12), et pour le tenseur énergie-impulsion (contravariant), les valeurs indiquées en (6).²¹ »

Cela conduit Einstein à proposer une modification de son équation de la relativité générale qui résout cette incompatibilité, à savoir l'introduction de la constante cosmologique :

« Cependant, le système d'équations (14) autorise une extension immédiatement suggérée qui est compatible avec le postulat de relativité [...]. En effet, au membre de gauche de l'équation de champs (13), nous pouvons ajouter le tenseur fondamental $g_{\mu\nu}$, multiplié par une certaine constante, λ , aujourd'hui inconnue, sans détruire la covariance générale.²² »

Il présente l'équation ainsi modifiée :

$$G_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu} = -\kappa(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Tg_{\mu\nu}) \quad (4)$$

Cette équation est cette fois compatible avec le choix de $T_{\mu\nu}$ et de $g_{\mu\nu}$ fait par Einstein (en d'autres mots, avec son choix de modèle d'Univers) à condition que :

$$\lambda = \frac{\kappa\rho}{2} = \frac{1}{R^2} \quad (5)$$

Cette modification a priori substantielle peut interroger ; c'est vraisemblablement la raison pour laquelle Einstein tente de rassurer le lecteur en soulignant qu'elle n'a pas de conséquence astronomique observable au niveau du système solaire : « Cette équation de champ, tant que λ est suffisamment petit, est de toute façon compatible avec les faits expérimentaux du système solaire.²³ ». Cela souligne en outre la nature théorique du problème qui motive cette modification de l'équation. Il ne s'agit en effet pas de résoudre un problème empirique au sens de [Laudan \(1977, p. 14\)](#), autrement dit « quoi que ce soit du monde naturel qui nous frappe comme étrange, ou en tout cas comme nécessitant une explication²⁴ ». Au contraire, il faut préserver autant que possible que le pouvoir prédictif de la relativité générale, qui explique avec succès la précession du périhélie de Mercure, et cela est d'autant plus évident s'il est garanti que la modification de la théorie n'implique aucune conséquence observable. Un autre fait notable, notamment souligné par [O'Raifeartaigh et al. \(2017, p. 34\)](#), est qu'Einstein ne propose aucune valeur numérique pour λ , R ou la masse de l'univers (dont il donne une expression analytique) à partir d'estimations astronomiques de ρ . C'est seulement dans des correspondances postérieures à l'article de 1917 qu'Einstein tente des estimations numériques, e.g. dans des lettres à Michele Besso en mars 1917 ([Einstein, 1979](#), pp. 58-62)²⁵. Il semble dès lors que la démarche d'Einstein s'inscrit d'abord dans la résolution d'un problème fondamentalement théorique, et que les considérations empiriques ont joué un rôle seulement partiel dans la conduite de son raisonnement, dont l'article de 1917 est l'aboutissement. Cela apparaît encore plus nettement dans sa correspondance avec de Sitter :

21. Trad. de l'anglais : “The system of equations (13) [les équations d'Einstein] is by no means satisfied when we insert for the $g_{\mu\nu}$ the values given in (7), (8), and (12), and for the (contravariant) energy-tensor of matter the values indicated in (6) [$T_{\mu\nu}$]”

22. Trad. de l'anglais : “However, the system of equations (14) allows a readily suggested extension which is compatible with the relativity postulate [...]. For on the left-hand side of field equation (13) we may add the fundamental tensor $g_{\mu\nu}$, multiplied by a universal constant, λ , at present unknown, without destroying the general covariance.”

23. Trad. de l'anglais : “This field equation, with λ sufficiently small, is in any case also compatible with the facts of experience derived from the solar system”

24. Trad. de l'anglais : “anything about the natural world that strikes us as odd, or otherwise in need of explanation”

25. La première de ces deux lettres avait incorrectement été datée à décembre 1916, comme le relève [O'Raifeartaigh et al. \(2017, p. 14\)](#)

« Pour moi, cependant, c'était une question brûlante de savoir si le concept relativité pouvait être poursuivi jusqu'au bout ou bien s'il menait à des contradictions. Je suis désormais satisfait d'avoir pu concevoir l'idée jusqu'au bout sans avoir rencontré de contradiction. Je ne suis plus affligé par ce problème, qui auparavant ne m'accordait aucune paix. Que le modèle que j'ai développé moi-même corresponde à la réalité ou non est une autre question, au sujet de laquelle nous n'obtiendrons probablement jamais davantage d'information. [nos emphases] ²⁶ » (Einstein 1917a)

Laudan propose d'analyser la conduite et le progrès scientifiques comme la résolution de problèmes pouvant être soit empiriques (cf. plus haut), soit conceptuels. Les problèmes conceptuels peuvent être internes « Lorsqu'une théorie révèle certaines incohérences, ou bien lorsque ses catégories fondamentales d'analyse sont vagues ou non claires ²⁷ » ou externes (« Lorsque qu'une théorie T est en conflit avec une autre théorie ou doctrine T' , et que les partisans de T la jugent rationnellement et solidement établie ²⁸ ») (Laudan, 1977, p. 49).

Pour Einstein, retenir la métrique de Minkowski comme limite générale aurait entraîné un problème conceptuel externe inadmissible : l'incompatibilité entre la théorie et le principe de Mach de la relativité de l'inertie. A contrario, renoncer comme de Sitter à énoncer de telles conditions générales eut impliqué une certaine sous-détermination insatisfaisante pour lui, posant cette fois un problème conceptuel interne (la sous-détermination des conditions aux limites). Son modèle d'univers, statique, sphérique, avec une constante cosmologique fixe, a pour finalité de résoudre ces problèmes.

4 Le modèle B de de Sitter

De Sitter n'était pas convaincu de l'importance du principe de relativité de l'inertie (Barbour, 1990, p. 61). De ce fait, l'incompatibilité éventuelle de la relativité générale avec ce principe ne représentait pas un problème conceptuel pertinent à ses yeux. Cela explique son scepticisme vis-à-vis de la démarche d'Einstein, qui transparaît dans leur correspondance (cf. Section 2). En mars 1917, cependant, de Sitter prend au sérieux la proposition par Einstein d'un nouveau terme dans son équation ($\lambda g_{\mu\nu}$). Dans une lettre adressée à Einstein, il propose une solution de l'équation d'Einstein modifiée (i.e. avec constante cosmologique) dans un univers dépourvu de matière (de Sitter, 1917). De Sitter fait remarquer à Einstein que non seulement sa solution engendre également une inertie, mais en outre, elle implique que $g_{\mu\nu}$ tende vers 0 à l'infini, c'est-à-dire une condition aux limites invariante quelque soit le système de coordonnées. Autrement dit, de Sitter satisfait les conditions que souhaitait atteindre Einstein sans recourir à de la matière :

« Je ne sais pas si l'on peut dire que "l'inertie est expliquée" de cette façon. Je ne me préoccupe pas moi-même d'explications. Si une seule particule test existait dans ce monde, c'est-à-dire, s'il n'y avait ni soleil ou étoiles, etc., alors elle aurait une certaine inertie. ²⁹ » (de Sitter 1917)

26. Trad. de l'anglais : "For me, though, it was a burning question whether the relativity concept can be followed through to the finish or whether it leads to contradictions. I am satisfied now that I was able to think the idea through to completion without encountering contradictions. Now I am no longer plagued with the problem, while previously it gave me no peace. Whether the model I formed for myself corresponds to reality is another question, about which we shall probably never gain information."

27. Trad. de l'anglais : "when [a theory] exhibits certain internal inconsistencies, or when its basic categories of analysis are vague and unclear"

28. Trad. de l'anglais : "When [a theory] T is in conflict with another theory or doctrine T' , which proponents of T believe to be rationally well-founded"

29. Trad. de l'anglais : "I do not know if it can be said that "inertia is explained" in this way. I do not concern myself with explanations. If a single test particle existed in the world, that is, there were no sun and stars, etc., it would have inertia."

Ce modèle est fondé sur une géométrie alternative. Là où l'espace-temps du modèle d'Einstein est "cylindrique" (O'Riartaigh et al., 2017, p. 30) (avec une espace de dimension trois, généré selon une quatrième dimension temporelle), l'espace-temps du modèle de de Sitter est lui-même sphérique, embarqué dans un espace euclidien de dimension 5. Ce plus haut degré de symétrie conduit Sitter à privilégier ce second modèle (Barbour, 1990, p. 61-62), mais aussi à questionner l'intérêt de λ :

« Personnellement je préfère largement le système à 4 dimensions, mais encore davantage la théorie originale, sans l'indéterminable λ , qui est n'est simplement pas désirable philosophiquement et physiquement, et avec des valeurs de $g_{\mu\nu}$ non invariantes à l'infini.³⁰ » (de Sitter 1917)

Pour Willem de Sitter, en l'absence de conséquence observable, il s'agit surtout d'une question de "goût personnel" : « Mais si λ est petit, cela ne fait aucune différence, et le choix relève simplement d'une question de goût.³¹ » (de Sitter, 1917)

Einstein et de Sitter privilégient des solutions différentes, car ils cherchent à résoudre des problèmes conceptuels différents. Pour de Sitter, le principe de Mach n'est pas un objectif à atteindre, et il est plus important de préserver un haut-degré de symétrie entre les dimensions spatiales et la dimension temporelle. Avec de tels objectifs, la constante λ est parfaitement superflue.

En l'absence de conséquences observables, la théorie est sous-déterminée. Il peut paraître aussi légitime de retenir ou non cette constante λ : tout dépend des choix de priorité dans la manière d'ordonner les problèmes conceptuels, qui sont le reflet d'un projet plus global. De cette manière, les choix divergents d'Einstein et de de Sitter contribuent à révéler leurs objectifs.

L'existence d'une solution comme celle de de Sitter pose à nouveau un problème pour Einstein et sa poursuite du principe de Mach, comme il l'admet lui-même dans une seconde lettre datée de mars 1917 :

« À mon avis, il serait insatisfaisant qu'un monde sans matière soit possible. Plutôt, le champ $g_{\mu\nu}$ devrait être entièrement déterminé par la matière et ne devrait pouvoir exister sans elle. C'est le fondement de ce que j'appelle le critère de relativité de l'inertie.³² » (Einstein 1917b)

Einstein tente une réponse à ce problème en 1918. Il estime que le modèle B présente une surface singulière, qu'il interprète comme une concentration de matière :

« Si la solution de De Sitter était partout valide, elle montrerait que l'introduction de λ ne remplit pas la fonction que j'ai souhaitée [notre emphase]. Parce que, de mon point de vue, la théorie de la relativité générale est un système satisfaisant seulement si elle démontre que les qualités physiques de l'espace sont complètement déterminées par la seule matière. Le système de De Sitter ne ressemble pas du tout à un univers dépourvu de matière, mais plutôt à un univers dont la matière serait entièrement concentrée sur [une] surface.³³ » (Einstein 1918)

Cette interprétation relevait d'une erreur qu'Einstein dut admettre plus tard (O'Riartaigh et al., 2017, p. 464). Cependant, cette lettre d'Einstein atteste fortement notre idée selon laquelle pour lui,

30. Trad. de l'anglais : "I personally much prefer the four-dimensional system, but even more so the original theory, without the undeterminable λ , which is just philosophically and not physically desirable, and with noninvariant $g_{\mu\nu}$'s at infinity."

31. Trad. de l'anglais : "But if λ is only small, it makes no difference, and the choice is purely a matter of taste."

32. Trad. de l'anglais : "In my opinion, it would be unsatisfactory if a world without matter were possible. Rather, the $g_{\mu\nu}$ -field should be fully determined by matter and not be able to exist without the matter. This is the core of what I mean by the requirement of the relativity of inertia."

33. Trad. de l'anglais : "If the De Sitter solution were valid everywhere, it would show that the introduction of the λ term does not fulfill the purpose I intended. Because, in my opinion, the general theory of relativity is a satisfying system only if it shows that the physical qualities of space are completely determined by matter alone [...] The De Sitter system does not look at all like a world free of matter, but rather like a world whose matter is concentrated entirely on [a] surface."

l'objectif premier réalisé par l'introduction de λ n'était pas de construire un univers statique mais bien d'accomplir le principe de relativité de l'inertie. La constante cosmologique avait pour objectif premier de *contraindre* la nature des solutions du vide des équations d'Einstein, en imposant $G_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu}$ plutôt que $G_{\mu\nu} = 0$. Le modèle de de Sitter était problématique en ce qu'il suggérait que cela n'était pas suffisant, et en fait donc d'une certaine façon inutile au regard du but poursuivi. Il nous faut ici tirer quelques conséquences de ce récit de l'introduction de λ chez Einstein. Premièrement, nous avons conclu précédemment que les considérations empiriques n'ont joué qu'un rôle partiel dans ce processus. Deuxièmement, nous avons vu qu'Einstein concevait lui-même l'introduction de λ comme l'aboutissement d'une réalisation du principe de relativité de l'inertie. À cela nous pouvons ajouter que, selon Kerszberg (1989, p. 163,166), Einstein lui-même n'a pas toujours attribué la même origine physique de l'apparition de la constante λ , l'attribuant parfois à la "finitude de l'espace", parfois à la "distribution statique de la matière". Ces trois éléments nous conduisent à soutenir qu'on ne peut réduire le rôle de λ pour Einstein à la conception d'un modèle d'univers statique sur des fondements empiriques.

5 L'abandon de la constante cosmologique

À la fin de sa vie, Einstein avait renoncé à la poursuite du principe de Mach. Tel en atteste sa lettre à Felix Pirani de 1954, comme le relève Hoefer (1994, p. 330) :

« Selon moi, on ne devrait plus parler du principe de Mach du tout. Il date de l'époque où l'on pensait que les "corps ponderables" étaient les seules entités physiques réelles et que tous les éléments de la théorie qui ne sont pas entièrement déterminés par eux doivent être évités. (Je suis bien conscient du fait que j'ai moi-même longtemps été influencé par cette idée fixe).³⁴ » (Einstein 1954)

Comment ce renoncement s'est-il produit ? Selon Hoefer (1994, pp. 326-330), l'importance accordée par Einstein au principe de Mach diminue rapidement dès les années qui suivent l'introduction de son modèle cosmologique. Il s'appuie notamment sur la transcription d'une conférence donnée par Einstein à Leiden en mai 1920, dans laquelle on peut en effet constater un certain glissement :

« Les idées de Mach trouvent leur développement complet dans l'éther de la théorie générale de la relativité générale. Selon cette théorie les propriétés métriques du continuum d'espace-temps sont en partie conditionnées par la matière existant au-delà de la région considérée. [nos emphases]³⁵ » (Einstein 1923)

Selon cette description, la matière n'explique plus en totalité, mais seulement partiellement les propriétés de la métrique. L'emploi du terme éther suggère déjà l'attribution d'une ontologie propre à la métrique, partiellement indépendante de la présence de la matière.

Hoefer attribue ce renoncement progressif en partie à l'engouement d'Einstein pour le projet entrepris par Weyl d'une théorie unifiée de la gravitation et de l'électromagnétisme. Selon lui, ce projet présuppose d'attribuer une réalité propre à l'espace, ce qui est incompatible avec une description purement Machienne (Hoefer, 1994, pp. 329-330). Cette idée est également défendue par (Kerszberg, 1989, p. 103)³⁶.

34. Trad. de l'anglais : "In my view one should no longer speak of Mach's principle at all. It dates back to the time in which one thought that the "ponderable bodies" are the only physically real entities and that all elements of the theory which are not completely determined by them should be avoided. (I am well aware of the fact that I myself was long influenced by this idée fixe) "

35. Trad. de l'anglais : "Mach's idea finds its full development in the ether of the general theory of relativity. According to this theory the metrical qualities of the continuum of space-time [...] are partly conditioned by the matter existing outside of the territory under consideration"

36. "It was only later that Einstein began to abandon the Machian demand : the pressure came as much from cosmology as from a growing faith in a unified field theory, according to which matter was to be interpreted as a particular configuration of the field rather than as the cause of the field"

Quoi qu'il en soit, Einstein n'emploie plus l'expression "relativité de l'inertie" après 1920 (Hoefler, 1994, p. 330)³⁷.

Le principe de Mach perdant son rôle directeur pour Einstein, son modèle d'Univers perd son intérêt conceptuel initial. Il renoncera définitivement à son modèle "statique" aux débuts des années 1930, en raison d'une accumulation de problèmes irréconciliables avec son hypothèse, le coup fatal étant porté par la "découverte" de l'expansion de l'univers en 1929.

Les années 1920 connaissent le développement des premiers modèles explicitement non statiques de l'univers (cf. O'Raifeartaigh et al. 2017, p. 464 et O'Raifeartaigh et al. 2018, p. 82), d'abord par Friedman (1922), puis par Lemaître (1927). Friedman et Lemaître considèrent tous les deux la possibilité d'une constante cosmologique non nulle. Lemaître propose d'établir un lien entre la "fuite apparente" des nébuleuses extra-galactiques (déduite de la mesure du décalage vers le rouge de leurs raies spectrales) et la dynamique de l'univers. Il juge le mérite relatif des modèles de de Sitter et d'Einstein à l'aune de leur adéquation empirique, et non en vertu de leurs apports conceptuels :

« Les deux solutions ont donc leur avantage. L'une [le modèle de de Sitter] s'accorde avec l'observation des vitesses radiales des nébuleuses, l'autre [le modèle d'Einstein] tient compte de la présence de la matière et donne une relation satisfaisante entre le rayon de l'Univers et la masse qu'il contient. Il semble désirable d'obtenir une solution intermédiaire qui pourrait combiner les avantages de chacune d'elles. » (Lemaître 1927, p. 50)

Pour Lemaître, l'objectif est de résoudre un problème empirique (au sens de Laudan), en proposant un modèle susceptible d'expliquer la vitesse radiales des nébuleuses tout en intégrant le "fait évident" (Lemaître, 1927, p. 49) que constitue la présence de matière. Einstein accorde d'abord peu de valeur aux modèles dynamiques de Friedman et Lemaître (O'Raifeartaigh et al., 2018, p. 82), ce que l'on est tenté d'attribuer à une méconnaissance des données astronomiques ou une forme de désintérêt pour celles-ci (*ibid*). Mais en 1929, les idées de Lemaître sont soutenues par l'observation d'une relation linéaire entre vitesses radiales et distances des nébuleuses par Hubble (1929). Le modèle d'Einstein est alors fragilisé pour essentiellement deux raisons. La première est l'observation de Hubble qui suggère que l'univers est en expansion. La seconde est un problème de cohérence du modèle lui-même, celui-ci étant instable, comme relevé par exemple par Eddington (1930) :

« Si maintenant [dans l'univers d'Einstein], il y a une petite perturbation [une densité légèrement inférieure] [...] l'univers s'expand. L'expansion diminuera sa densité ; le déficit empirera, et [l'accélération de l'expansion] augmentera. De façon similaire, s'il y a un léger excès de masse, une contraction se produit, qui augmente sans cesse. Clairement, le monde d'Einstein est instable.³⁸ »

Ces deux problèmes conduisent Einstein à renoncer définitivement à son modèle, et, en 1931, à en proposer un nouveau qui soit capable d'expliquer la relation établie par Hubble (O'Raifeartaigh & McCann, 2014).

Au départ, comme nous l'avons démontré, le modèle d'Einstein n'était pas construit dans un but empirique. Cependant, dès lors que son intérêt conceptuel est apparu nul (en raison du modèle concurrent de de Sitter et du désintérêt d'Einstein pour le principe de Mach), et que le problème prioritaire est devenu l'explication de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques, le modèle perdait tout pouvoir d'explication et Einstein dut y renoncer. Son nouveau modèle avait un objectif totalement différent (donner une explication aux données astronomiques) et fut construit dans ce

37. "Einstein ceases to use the term "relativity of inertia" at least by 1920, and in later discussions of Mach's ideas on inertia he grows less enthusiastic and more careful in saying that their fulfilment in GTR is only partial." (Hoefler, 1994, p. 330)

38. Trad. de l'anglais : "If now there is a slight disturbance [under-density] [...] the universe accordingly expands. The expansion will decrease the density; the deficit thus becomes worse, and [the acceleration of the expansion] increases. Similarly if there is a slight excess of mass a contraction occurs which continually increases. Evidently Einstein's world is unstable"

sens. La constante cosmologique n'étant pas nécessaire à ce nouvel objectif, elle fut abandonnée par lui.

6 Eddington et la constante cosmologique

Le renoncement d'Einstein contraste fortement avec l'attitude d'Eddington, qui soutient au contraire avec force la nécessité de la constante cosmologique (cf. [Kerszberg 1989](#), p. 164-166 ; [Barrow 1990](#), p. 73-78). Sa défense radicale de λ est particulièrement explicite dans son livre *The expanding universe* ([Eddington, 1933](#)), bien qu'il en ait fait état plus tôt (par exemple dans un article de [1931](#)). Un premier argument donné dans son livre est que cette constante est capable d'expliquer l'origine de l'expansion observée de l'univers (p. 25-26). Il est alors remarquable qu'à partir d'une même situation expérimentale, Eddington et Einstein opèrent des choix aussi divergents. Nous proposons de montrer que cette divergence s'explique par des priorités conceptuelles différentes.

La défense de la constante cosmologique d'Eddington repose en effet sur un autre argument, cette fois de nature conceptuelle, auquel il donne un poids prépondérant :

« Une fois qu'il est admis qu'il existe partout un rayon de courbure prêt à servir d'étalon, et que les distances spatiales sont directement ou indirectement exprimées en termes de cet étalon, la loi de gravitation ($G_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu}$) suit sans hypothèse supplémentaire ; ainsi l'existence de la constante cosmique λ avec la force de répulsion cosmique correspondante est établie. Étant ainsi fondée sur une nécessité fondamentale de l'espace physique, la position de la constante cosmique me semble inviolable ; et si jamais la théorie de la relativité devait tomber en discrédit, la constante cosmique serait le dernier rempart à sauter. *Abandonner la constante cosmique détruirait l'espace.* [emphasis d'Eddington]³⁹ » ([Eddington 1933](#), p. 104)

Pour Eddington, la constante cosmologique est intimement liée au rayon de courbure, car c'est-elle qui impose une relation entre celui-ci et le contenu de l'univers ([Kerszberg, 1989](#), 164). En outre, selon lui, le rayon de courbure définit un étalon de longueur en fonction desquelles toutes les autres longueurs fondamentales, comme le rayon de l'atome d'hydrogène, doivent pouvoir s'exprimer :

« Puisque le rayon de courbure est l'unité à laquelle se réfèrent nos équations physiques fondamentales, quoi que ce soit dont l'extension est déterminée par des équations physiques doit avoir une longueur constante en fonction de cette unité. Si dans les équations les plus fondamentales de la physique, nous adoptons le rayon de courbure R_s comme une unité en lieu des unités arbitraires actuelles, nous devrions avoir accompli une première étape vers une simplification de leur forme. ⁴⁰ » ([Eddington 1933](#), p. 100)

Selon Eddington, une telle relation entre le rayon de courbure et le rayon de l'atome d'hydrogène semble difficile à établir *a priori* du fait que ces deux quantités possèdent des ordres de grandeur très différents (p. 107). Cependant, une certaine coïncidence numérique suggère que cela est possible en faisant intervenir le nombre d'électrons dans l'univers (\mathcal{N}). En mobilisant des arguments issus de la mécanique quantique, il propose la relation suivante (p. 111), faisant intervenir la charge e et la masse m de l'électron (le terme de droite est proportionnel au rayon de l'électron) :

39. Trad. de l'anglais : “When once it is admitted that there exists every-where a radius of curvature ready to serve as a comparison standard, and that spatial distances are directly or indirectly expressed in terms of this standard, the law of gravitation ($G_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu}$) follows without assumption ; and accordingly the existence of the cosmical constant λ with the corresponding force of cosmical repulsion is established. Being in this way based on a fundamental necessity of physical space, the position of the cosmical constant seems to me impregnable ; and if ever the theory of relativity falls into disrepute the cosmical constant will be the last stronghold to collapse. To drop the cosmical constant would knock the bottom out of space.”

40. Trad. de l'anglais : “Since the radius of curvature is the unit referred to in our fundamental physical equations, anything whose extension is determined by constant physical equations will have a constant length in terms of that unit. [...] If in the most fundamental equations of physics we adopt the curvature R_s as a unit instead of the present arbitrary units, we shall have at least made the first step towards reducing them to a simpler form.”

$$\frac{R}{\sqrt{N}} = \frac{e^2}{mc^2} \quad (6)$$

Un tel raisonnement l'avait déjà conduit, deux ans plus tôt, à proposer une expression de λ à partir d'autres unités fondamentales (M étant la masse du proton, et α la constante de structure fine ; Eddington 1931) :

$$\lambda = \left(\frac{2GM}{\pi} \right)^2 \left(\frac{2\pi m\alpha}{h} \right)^4 \quad (7)$$

Barrow (1990, p. 74-75) souligne qu'Eddington avait déjà proposé l'existence d'une telle relation dans son ouvrage *The Mathematical Theory of Relativity* (1923), soit bien avant la découverte de l'expansion de l'univers. Il faut donc admettre là encore l'importance des problèmes conceptuels dans le recours à λ . Pour Barrow, une telle proposition s'inscrit dans la volonté d'Eddington d'unification des constantes "microphysiques et macrophysiques" de la nature (p. 77), et de la théorie quantique avec la relativité générale (p. 74). Il rapproche en outre cet effort au "subjectivisme sélectif" d'Eddington, qu'il formule ainsi : « beaucoup de ce qui passe pour un savoir objectif sur le monde a en réalité une caractère épistémologique très partiel.⁴¹ » (p. 74). Bien qu'une élaboration des motivations philosophiques profondes d'Eddington dépasse le cadre de notre propos, il semble assez bien établi que le rôle que celui-ci confie à la constante λ ne peut-être compris sans la replacer dans l'édifice conceptuel qu'elle doit aider à consolider, et que sa fonction empirique est plutôt marginale.

7 Une interprétation à l'aide de Laudan

Selon une description courante, Einstein avait introduit la constante cosmologique pour concevoir un modèle statique de l'univers, et il dut renoncer après la découverte de son expansion par Hubble. Une telle lecture de l'histoire masque le fait qu'Einstein proposa deux modèles d'univers avec deux objectifs totalement différents à chaque fois : la résolution d'un problème conceptuel en 1917, sans véritable préoccupation empirique, puis la résolution d'un problème d'ordre empirique en 1931.

La description simpliste, qui suggère qu'Einstein aurait développé un premier modèle à vocation réaliste de l'univers, pour le réviser à la lumière des derniers faits astronomiques, suppose une vision empiriste de la science. C'est précisément une telle vision qu'attaque Laudan, en défendant le rôle des problèmes conceptuels dans l'élaboration et le progrès de la science :

« N'importe quelle théorie sur la nature de la science qui ne trouve aucun rôle pour les problèmes conceptuels abandonne toute prétention à être une théorie à propos de la manière dont la science a effectivement évolué.⁴² » (Laudan, 1977, p. 66) ; « Cette seconde sorte de problème, que j'appelle problème conceptuel, a été largement ignoré par les historiens et philosophes des sciences, probablement parce qu'elle ne s'accommode pas bien avec ces épistémologies empiriques de la science qui dominent depuis plus d'un siècle.⁴³ » (Laudan, 1977, p. 45)

Au contraire, en 1917, à travers sa tentative de réalisation du principe de Mach, Einstein poursuivait un objectif conceptuel, guidé par un engagement philosophique profond. De la même manière, il est apparu que les motivations d'Eddington pour soutenir la constante cosmologique, enracinées dans cet effort d'unification de l'infiniment petit et de l'infiniment grand, étaient essentiellement conceptuelles et non empiriques.

41. Trad. de l'anglais : "much of what passes for objective knowledge about the world is really partially epistemological in character."

42. Trad. de l'anglais : "Any theory about the nature of science that finds no role for conceptual problems forfeits any claim to being a theory about how science has actually evolved"

43. Trad. de l'anglais : "This latter type of problem, which I call a conceptual problem, have been largely ignored historians and philosophers of science, presumably because it does not comport well with those empiricist epistemologies of science which have been the reigning fashion for more than a century."

Un autre apport de [Laudan](#) est sa rationalisation et sa défense du processus de modifications *ad-hoc* des théories, que les philosophies de Popper ou Lakatos condamnent selon lui (p. 114). Selon son interprétation, Lakatos, par exemple, conteste la valeur scientifique des modifications *ad-hoc* visant à résoudre une anomalie mais qui n'ont pas pour conséquence d'augmenter le contenu empirique d'une théorie. Laudan critique une telle position pour plusieurs raisons. La première est qu'on ne peut selon lui déterminer à l'avance si la modification de la théorie altère son contenu empirique au-delà du problème qu'il s'agit de résoudre : « un tel jugement [...] nécessiterait une clairvoyance surhumaine⁴⁴ » (p. 114). En introduisant la constante λ , Einstein, qui espérait d'ailleurs que ses conséquences empiriques soient aussi faibles que possible pour ne pas altérer les prédictions de sa théorie pour le système solaire, ne se doutait pas que cette constante jouerait un rôle fondamental par la suite avec la découverte de l'accélération de l'expansion de l'univers. Pour Laudan, une modification *ad-hoc* est licite et même progressive à moins qu'elle ne génère plus de problèmes qu'elle n'en résout (p. 117). En 1917, étant donnés les problèmes poursuivis par Einstein, l'introduction *ad-hoc* de λ devait résoudre un problème conceptuel sans introduire de problème empirique. En 1931, l'abandon du critère de Mach comme problème conceptuel, la reconnaissance d'anomalies conceptuelles dans le modèle d'univers d'Einstein et l'apparition de la fuite des nébuleuses extragalactiques comme problème empirique, suggéraient au contraire l'abandon de cette modification *ad-hoc*. En ce sens, la description de Laudan permet de comprendre le cheminement d'Einstein comme un processus rationnel et scientifiquement admissible.

Au-delà de la mise en avant du rôle des problèmes conceptuels qu'elle propose et de la rationalisation des modifications *ad-hoc*, l'épistémologie de Laudan nous permet d'éclairer le rapport d'Einstein à la constante cosmologique d'une autre manière.

Laudan cherche à dépasser, d'un côté, le cadre des paradigmes de Kuhn, et de l'autre, celui des programmes de recherche des Lakatos. Parmi les critiques qu'il adresse à ces deux théories, il en est une commune aux deux : le présupposé d'un cœur rigide et irréformable ([Laudan, 1977](#), p. 75, 78). En réponse aux objections qu'il adresse à Kuhn et Lakatos, Laudan élabore le concept de traditions de recherche ([Laudan, 1977](#), Ch. 3) :

« Une tradition de recherche est un ensemble d'hypothèses générales à propos des entités et des processus d'un domaine d'étude, et à propos des méthodes utilisables pour investiguer des problèmes et construire des théories dans ce domaine.⁴⁵ » (p. 81)

Le modèle de Laudan opère donc une distinction d'un côté les traditions de recherches, et de l'autre les théories qui peuvent s'inscrire dans ces traditions. Les premières – dont il donne comme exemples le Darwinisme et le mécanisme – sont très générales, et, au contraire des secondes, ne permettent pas de formuler des “prédictions précises”. Laudan souligne le rôle heuristique à la fois positif des traditions de recherche, en ce qu'elles offrent des objets sujets d'investigation, et leur rôle heuristique négatif, en ce qu'elles imposent des contraintes sur les théories admissibles. [Laudan](#) cite pour exemple le rejet de l'action à distance chez les “Cartésiens” (dans lesquels il inclut Leibniz) ou les traditions rejetant la postulation d'entités ne pouvant être observées (p. 89). [Laudan](#) admet cependant que des aspects centraux des traditions de recherche puissent être révisés (p. 96).

Le modèle ainsi proposé par Laudan semble pouvoir décrire adéquatement le récit que nous venons de proposer. Nous pouvons dire que l'élaboration de la relativité générale prend place dans une tradition relativiste, dont les principes peuvent-être entendus comme ceux explicitement énoncés par [Einstein \(1918\)](#) : principe de relativité, principe de covariance, principe de Mach. Ces principes ont inspiré et contraint la forme des équations d'Einstein, d'une telle manière que celui-ci jugea nécessaire leur modification par l'introduction de la constante λ en 1917. Cependant, l'accumulation de problèmes conceptuels impliquant l'implémentation du principe de Mach (soulignés

44. Trad. de l'anglais : “such as judgment [...] would require a super-human clairvoyance”

45. Trad. de l'anglais : “A research tradition is a set of general assumptions about the entities and processes in a domain of study, and about the appropriate methods to be used for investigating the problems and constructing the theories in that domain.”

notamment par de Sitter) et l'importance accrue accordée au désir d'unification des théories de l'électromagnétisme et de la gravitation conduisent Einstein à abandonner le principe de relativité de l'inertie, malgré son rôle historique fondamental dans la conception de la théorie de la relativité générale (cf. sections 4 et 5). En ce sens, la tradition poursuivie par Einstein, que l'on peut inscrire dans la filiation des positions relativistes de Mach ou Leibniz sur l'espace, est bien réformable, et donc de ce point de vue davantage conforme à l'image de Laudan qu'à celles de Kuhn ou Lakatos. La seconde proposition cosmologique d'Einstein de 1931 se comprend en outre parfaitement selon la rationalité proposée par [Laudan \(1977, p. 66\)](#), selon laquelle les théories progressent en maximisant le nombre de problèmes empiriques résolus tout en minimisant le nombre de problèmes conceptuels. En effet, ce modèle avait pour finalité la résolution du problème empirique posé par la fuite des galaxies, sans recourir la constante λ dont la postulation avait alors acquis un aspect problématique aux yeux d'Einstein.

Conclusion

Le rapport d'Einstein à la constante cosmologique est de nature à conforter la description de Laudan. D'une part, notre récit souligne le rôle fondamental des problèmes conceptuels dans la conception théorique, en indiquant le rôle fondamental du principe de Mach dans l'introduction de λ par Einstein et l'élaboration de son premier modèle cosmologique. La rationalité de ce processus échapperait en effet à une vision purement empirique reléguant au second plan le rôle des problèmes conceptuels, et rejetant les modifications *ad-hoc* des théories. D'autre part, le renoncement d'Einstein au principe de Mach révèle le caractère réformable des principes métaphysiques dirigeant l'élaboration des théories, sans que cela n'implique le basculement dans un nouveau paradigme ou que ces théories en soient nécessairement condamnées. On peut en outre penser que la théorie de Laudan offre une perspective potentiellement féconde pour comprendre la notion contemporaine de "problème de la constante cosmologique" ([Weinberg, 1989](#)).

Références

- Barbour, J. B. (1990). The part played by mach's principle in the genesis of relativistic cosmology. In B. Bertotti (Ed.), *Modern cosmology in retrospect* (p. 47-66). Cambridge England New York : Cambridge University Press.
- Barrow, J. D. (1990). The mysterious lore of large numbers. In B. Bertotti (Ed.), *Modern cosmology in retrospect* (p. 67-93). Cambridge England New York : Cambridge University Press.
- de Sitter, W. (1916, décembre). On einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. second paper. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 77(2), 155–184. Consulté sur <https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155> doi: 10.1093/mnras/77.2.155
- de Sitter, W. (1917, mars). *Letter from Willem de Sitter*. Consulté sur <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/331>
- Eddington, A. S. (1930, mai). On the instability of Einstein's spherical world. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 90, 668-678. doi: 10.1093/mnras/90.7.668
- Eddington, A. S. (1931, octobre). On the value of the cosmical constant. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 133(822), 605–615. Consulté sur <https://doi.org/10.1098/rspa.1931.0170> doi: 10.1098/rspa.1931.0170
- Eddington, A. S. (1933). *The expanding universe : Astronomy's 'great debate', 1900–1931*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511564208
- Einstein, A. (1912, janvier). Gibt es eine Gravitationswirkung die der elektrodynamischen Induktionswirkung analog ist? *Vierteljahrschrift für Gerichtliche Medizin und Öffentliches Sanitätswesen*, 44, 37-40.
- Einstein, A. (1916a, 9 janvier). *Letter to Karl Schwarzschild*. Consulté sur <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/203>
- Einstein, A. (1916b, 14 mai). *Letter to Michele Besso*. Consulté sur <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/241>
- Einstein, A. (1916c, 4 novembre). *Letter to Willem de Sitter*. Consulté sur <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/289>
- Einstein, A. (1917, février). Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, 142-152. Consulté sur <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol6-trans/433>
- Einstein, A. (1917a, mars). *Letter to Willem de Sitter*. Consulté sur <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/329>
- Einstein, A. (1917b, 24 mars). *Letter to Willem de Sitter*. Consulté sur <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol8-trans/336>
- Einstein, A. (1918, janvier). Kritisches zu einer von Hrn. de Sitter gegebenen Lösung der Gravitationsgleichungen. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, 270-272. Consulté sur <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol7-trans/52>
- Einstein, A. (1918). Prinzipielles zur allgemeinen relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 360(4), 241–244. Consulté sur <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol7-trans/49> doi: 10.1002/andp.19183600402

- Einstein, A. (1921). *The meaning of relativity*. Methuen, London.
- Einstein, A. (1923). *Sidelights on relativity*. Dover Publications.
- Einstein, A. (1954, 2 février). *Letter to Felix Pirani*.
- Einstein, A. (1979). *Correspondance 1903-1955*. Paris : Hermann.
- Friedman, A. (1922, décembre). Über die krümmung des raumes. *Zeitschrift für Physik (On the curvature of space)*, 10(1), 377–386. Consulté sur <https://doi.org/10.1007/bf01332580> doi: 10.1007/bf01332580
- Hoefer, C. (1994, juin). Einstein's struggle for a machian gravitation theory. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 25(3), 287–335. Consulté sur [https://doi.org/10.1016/0039-3681\(94\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0039-3681(94)90056-6) doi: 10.1016/0039-3681(94)90056-6
- Hubble, E. (1929, mars). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15(3), 168–173. Consulté sur <https://doi.org/10.1073/pnas.15.3.168> doi: 10.1073/pnas.15.3.168
- Kerszberg, P. (1989). *The invented universe : the Einstein-De Sitter controversy (1916-17) and the rise of relativistic cosmology*. Oxford England New York : Clarendon Press Oxford University Press.
- Laudan, L. (1977). *Progress and its problems : Toward a theory of scientific growth*. University of California Press.
- Lemaître, G. (1927, janvier). Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, 47, 49-59.
- O’Raifeartaigh, C., & McCann, B. (2014, février). Einstein’s cosmic model of 1931 revisited : an analysis and translation of a forgotten model of the universe. *The European Physical Journal H*, 39(1), 63–85. Consulté sur <https://doi.org/10.1140/epjh/e2013-40038-x> doi: 10.1140/epjh/e2013-40038-x
- O’Raifeartaigh, C., O’Keeffe, M., Nahm, W., & Mitton, S. (2017, juillet). Einstein’s 1917 static model of the universe : a centennial review. *The European Physical Journal H*, 42(3), 431–474. Consulté sur <https://doi.org/10.1140/epjh/e2017-80002-5> doi: 10.1140/epjh/e2017-80002-5
- O’Raifeartaigh, C., O’Keeffe, M., Nahm, W., & Mitton, S. (2018, mars). One hundred years of the cosmological constant : from “superfluous stunt” to dark energy. *The European Physical Journal H*, 43(1), 73–117. Consulté sur <https://doi.org/10.1140/epjh/e2017-80061-7> doi: 10.1140/epjh/e2017-80061-7
- Smeenk, C. (2014). Einstein’s role in the creation of relativistic cosmology. In M. Janssen & C. Lehner (Eds.), *The cambridge companion to einstein* (p. 228–269). Cambridge University Press. doi: 10.1017/CCO9781139024525.009
- Weinberg, S. (1989, janvier). The cosmological constant problem. *Reviews of Modern Physics*, 61(1), 1–23. Consulté sur <https://doi.org/10.1103/revmodphys.61.1> doi: 10.1103/revmodphys.61.1