

Épistémologie de la relativité générale

Nicolae Sfetcu

21.12.2019

Sfetcu, Nicolae, « Épistémologie de la relativité générale », SetThings (21 décembre 2019), URL = <https://www.setthings.com/fr/epistemologie-de-la-relativite-generale/>

Email: nicolae@sfetcu.com



Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NonDerivatives 4.0 International. Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Une traduction partielle de
Sfetcu, Nicolae, "Epistemologia gravitației experimentale – Raționalitatea științifică", SetThings (1 august 2019), MultiMedia Publishing (ed.), ISBN: 978-606-033-234-3, DOI: 10.13140/RG.2.2.15421.61925, URL = <https://www.setthings.com/ro/e-books/epistemologia-gravitatiei-experimentale-rationalitatea-stiintifica/>

Les premières interprétations philosophiques de la théorie de la relativité générale (RG) sont très diverses, chacune essayant d'identifier Einstein comme un adepte de cette philosophie. Les partisans de Mach ont souligné la tentative d'Einstein de mettre en œuvre une « relativisation de l'inertie » dans la théorie générale, et son approche opérationnaliste de la simultanéité. Les kantien et les néo-kantien ont montré l'importance des « formes intellectuelles » synthétiques dans la théorie générale, en particulier le principe de covariance générale. Les empiristes logiques ont mis l'accent sur la méthodologie de la théorie, les conventions pour exprimer le contenu empirique.

Bertrand Russell a noté que¹

« Il y avait une tendance, pas inhabituelle dans le cas d'une nouvelle théorie scientifique, pour chaque philosophe à interpréter le travail d'Einstein selon son propre système métaphysique, et à suggérer que le résultat est une grande adhésion de pouvoir aux vues que le philosophe a déjà exprimées. Cela ne peut pas être vrai dans tous les cas, et on peut espérer que ce n'est vrai dans aucun. Il serait décevant qu'un changement fondamental tel qu'introduit par Einstein n'implique aucune nouveauté philosophique. »²

La plupart des premiers travaux d'Einstein révèlent qu'il est un partisan de Ludwig Boltzmann, plutôt que d'Ernst Mach, dans le débat sur l'atomisme.³ Cependant, en 1912, le nom d'Einstein a été affiché parmi ceux qui ont rejoint Mach dans un appel à former une « Société pour la philosophie positiviste. » À la fin de sa vie⁴, Einstein a écrit sur « l'influence profonde » exercée sur lui par l'École de mécanique de Mach et sur la très grande influence pendant sa jeunesse de la « position épistémologique de Mach ». Les déclarations épistémologiques et méthodologiques occasionnelles semblent indiquer un accord avec les parties essentielles de la doctrine positiviste de Mach.⁵ L'idée de Mach selon laquelle la masse et le mouvement inertiel du corps résultent de l'influence de toutes les autres masses environnantes était probablement la motivation la plus forte pour développer une théorie relativiste de la gravité.⁶

¹ Thomas A. Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Spring 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), <https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/genrel-early/>.

² Bertrand Russell, *Relativity: Philosophical Consequences*, in *Encyclopaedia Britannica: Thirteenth Edition Volume 31* (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA PRESS, 1926), 331.

³ Thomas Ryckman, *Einstein*, 1 edition (London ; New York: Routledge, 2011), chap. 3.

⁴ Albert Einstein, « Autobiographische Skizze », in *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, éd. par Carl Seelig (Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956), 21, https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2.

⁵ Albert Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, 23. Aufl. 2001. Nachdruck (Berlin: Springer, 2002).

⁶ Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

Un passage de la première exposition complète d'Einstein a montré que son exigence générale de covariance pour les équations du champ gravitationnel (ce qui signifie qu'elles restent inchangées sous la transformation arbitraire, mais continuellement adéquate, des coordonnées de l'espace-temps), « éloigne de l'espace et du temps le dernier vestige de l'objectivité physique ». Josef Petzoldt, un philosophe machien, a noté que Einstein est mieux caractérisé comme un positiviste relativiste.⁷ La philosophie contemporaine a montré que les remarques d'Einstein n'étaient que des références elliptiques à un « argument de trou », selon lequel si une théorie est en général covariante, les points vides de la manifestation espace-temps ne peuvent pas avoir une identité primitive inhérente, et donc pas de réalité indépendante.⁸ Donc pour une théorie covariante générale, aucune réalité physique ne s'accumule dans « l'espace vide » en l'absence des champs physiques, idée qui ce n'est pas un soutien au phénoménalisme positiviste.

La relativisation de tous les effets inertiels (« principe de Mach »), ainsi que le principe de relativité générale interprété par Einstein comme le principe de covariance générale, et avec le principe d'équivalence, ont été considérés par Einstein comme les trois principes piliers sur lesquels sa théorie était fondée.

Les portraits rétrospectifs de la méthodologie d'Einstein dans la genèse de la relativité générale se concentrent sur l'idée d'une stratégie qui prend en compte l'esthétique mathématique.⁹ Les positivistes et les opérationnalistes argumentaient avec l'analyse d'Einstein de la simultanéité comme élément méthodologique fondamental de la théorie de la relativité.

Les philosophes kantien n'ont pas accordé beaucoup d'attention à la théorie de la relativité. Cassirer a vu la théorie générale de la relativité comme une confirmation des principes fondamentaux de l'idéalisme transcendantal.¹⁰ Natorp¹¹ a apprécié le principe de la relativité comme étant compatible avec le kantianisme en distinguant les concepts transcendants idéaux et purement mathématiques de l'espace et du temps et leurs mesures physiques relatives. De cette relativisation, dit Natorp, il s'ensuit que « les événements sont ordonnés non pas par rapport au temps absolu, mais seulement comme des phénomènes déterminés dans la relation réciproque temporelle, une version du relationnalisme leibnizien. »¹² De plus, la constance de

⁷ Joseph Petzoldt, Giora Hon, et Ernst Mach, *Der Verhältnis der Machschen Gedankenwelt zur Relativitätstheorie, an appendix to Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt* (Xenomoi Verlag, 1921), 516.

⁸ John D. Norton, « General Covariance and the Foundations of General Relativity: Eight Decades of Dispute », *Reports of Progress in Physics* 56 (1993): 791–858.

⁹ Thomas Ryckman, « A Believing Rationalist », *The Cambridge Companion to Einstein*, mai 2014, 377-420, <https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.014>.

¹⁰ Ernst Cassirer, W. C. Swabey, et M. C. Swabey, *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity* (Courier Corporation, 2003), 172-73.

¹¹ Paul Natorp, *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften* (Sändig Reprint, H. R. Wohlwend, 1910), 399-404.

¹² Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

la vitesse de la lumière, considérée comme un présupposé empirique, « a rappelé que les déterminations absolues de ces mesures, qui ne peuvent être atteintes en science naturelle empirique, exigeraient une obligation absolue correspondante. »¹³ Natorp a considéré l'exigence d'invariante des lois de la nature concernant les transformations de Lorentz comme « peut-être le résultat le plus important de l'enquête de Minkowski. »¹⁴

Un certain nombre de positions néo-kantiennes, y compris celles de Marburg et Bollert,¹⁵ ont soutenu que la théorie de la relativité a clarifié la position kantienne dans l'esthétique transcendantale en montrant que ce n'est pas l'espace et le temps, mais la spatialité (déterminisme dans l'ordre positionnel) et la temporalité (dans l'ordre de succession) qui sont *a priori* des conditions de connaissance physique. Cette révision des conditions d'objectivité est essentielle à l'idéalisme critique.

L'interprétation néo-kantienne la plus influente de la relativité générale a été *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*¹⁶ d'Ernst Cassirer, dans laquelle la théorie est considérée comme un test crucial pour *Erkenntniskritik* (l'épistémologie des sciences physiques de l'idéalisme transcendantal de Marburg). Reconnaisant l'exigence d'une covariance générale, Cassirer a déclaré que la théorie générale de la relativité, avec les coordonnées de l'espace et du temps, ne représente que des symboles d'événements (« coïncidences »), des variables indépendantes de fonctions mathématiques (champ) qui caractérisent physiquement l'ampleur de l'état.¹⁷ La covariance générale serait l'affinement le plus récent du principe méthodologique de l'« unité de détermination » qui détermine les connaissances physiques en passant des concepts de substance aux concepts fonctionnels et relationnels. Cassirer a conclu que la théorie générale de la relativité présente « l'application et la réalisation les plus déterminées dans la science empirique de la position de l'idéalisme critique ». ¹⁸

E. Sellien¹⁹ a déclaré que les vues de Kant sur l'espace et le temps ne se réfèrent qu'à l'espace intuitif et étaient donc imperméables à l'espace et au temps mesurables de la théorie empirique d'Einstein.

L'empirisme logique de la philosophie des sciences a émergé principalement du fait des deux théories de la relativité d'Einstein, favorisant le conventionnalisme à la Poincaré plutôt que le

¹³ Ryckman.

¹⁴ Natorp, *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*, 403.

¹⁵ Karl Bollert, *Einstein's Relativitätstheorie und ihre Stellung im System der Gesamterfahrung* (T. Steinkopf, 1921).

¹⁶ Ernst Cassirer, *Zur Einstein'schen relativitätstheorie: Erkenntnistheoretische betrachtungen* (B. Cassirer, 1921), 1-125.

¹⁷ Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

¹⁸ Cassirer, Swabey, et Swabey, *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity*, 412.

¹⁹ Ewald Sellien, *Die erkenntnistheoretische Bedeutung der Relativitätstheorie* (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1919).

néo-kantianisme et le positivisme machien. On considère que la philosophie de l'empirisme logique de la science elle-même s'est formée à partir des leçons tirées de la théorie de la relativité. Certaines des doctrines les plus caractéristiques de cette philosophie (interprétant les éléments *a priori* des théories physiques comme des conventions, traitant du rôle nécessaire des conventions dans le développement de concepts théoriques à partir de l'observation, insistant sur le langage observationnel dans la définition des termes théoriques) ont été utilisées par Einstein pour modéliser ces deux théories de la relativité.²⁰

Reichenbach a développé la thèse de « la relativité de la géométrie », selon laquelle une géométrie arbitraire pour l'espace-temps peut être développée si les lois de la physique sont modifiées en conséquence par l'introduction de « forces universelles ». Mais le premier travail de Reichenbach sur la relativité a été écrit dans une perspective néo-kantienne.²¹ Selon Friedman²² et Ryckman,²³ Reichenbach a modifié la conception kantienne des principes synthétiques *a priori*, rejetant le sens « valable pour tous les temps », tout en conservant « le constituant de l'objet de la connaissance », aboutissant à une théorie spécifique « *a priori* relativisée ». Ainsi, une transformation apparaît dans la méthode de recherche épistémologique de la science par laquelle la « méthode d'analyse de la science » est proposée comme « la seule façon qui nous permette de comprendre la contribution de notre raison à la connaissance ». ²⁴ La méthodologie de rationalisation implique la distinction claire entre le rôle subjectif des principes et l'apport de la réalité objective. La théorie de la relativité est un brillant exemple de cette méthode car elle a montré que la métrique espace-temps décrit une « propriété objective » du monde, une fois que la liberté subjective de transformation des coordonnées (le principe de coordination de la covariance générale) est reconnue.^{25 26}

Einstein, dans une conférence de janvier 1921 intitulée « Géométrie et expérience », a soutenu que la question de la nature de la géométrie spatio-temporelle n'est un problème empirique que par rapport à certaines stipulations. La conception conventionnelle de Reichenbach a atteint sa maturité en 1922. Reichenbach a soutenu que les problèmes concernant la détermination empirique de la métrique espace-temps doivent tenir compte du fait que la géométrie et la physique soutiennent le test d'observation, ce qui est le cas en relativité générale d'Einstein (la méthode de Reichenbach a été appelée « l'analyse logique de la science ».) Ainsi, la détermination empirique de la métrique espace-temps par mesure nécessite le choix «

²⁰ Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

²¹ Hans Reichenbach, *Relativitätstheorie Und Erkenntnis Apriori* (J. Springer, 1920).

²² Michael Friedman, « Geometry, Convention, and the Relativized A Priori: Reichenbach, Schlick, and Carnap », *Reconsidering Logical Positivism*, juillet 1999, 21-34, <https://doi.org/10.1017/CBO9781139173193.006>.

²³ Thomas Ryckman, *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915-1925*, 1 édition (Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005).

²⁴ Reichenbach, *Relativitätstheorie Und Erkenntnis Apriori*, 74.

²⁵ Reichenbach, 90.

²⁶ Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

d'indicateurs métriques » en établissant une définition de coordination. Einstein, en collaboration avec Schlick et Reichenbach, a développé une nouvelle forme d'empirisme, appropriée pour argumenter la relativité générale contre la critique néo-kantienne.^{27 28}

Einstein a mis en œuvre une conception relationnelle ou relativiste du mouvement, conformément à l'attitude relationnelle de Leibniz envers l'espace et le temps et contrairement à l'attitude absolutiste de Newton. Par cela, des contraintes sont imposées à l'ontologie des théories de l'espace-temps, limitant le champ dans lequel les quantificateurs des théories sont situés à l'ensemble des événements physiques, c'est-à-dire dans l'ensemble des points de l'espace-temps qui sont réellement occupés par des objets ou processus matériels.²⁹ Le relationnisme reichenbachien, en revanche, imposent des contraintes à l'idéologie des théories spatio-temporelles, limitant le vocabulaire à un certain ensemble de prédicats préférés, tels que les prédicats définis en termes de relations « causales ».

Le conventionnalisme, comme le relationnel, est sceptique quant aux structures postulées par les théories de l'espace-temps. Elle pose le problème des propriétés géométriques (métriques) et des relations définies dans ce domaine. Friedman affirme que le conventionnalisme est étroitement lié au relationnalisme idéologique. Le conventionnalisme de base fait valoir que certains systèmes de description incompatibles à première vue, tels que les géométries euclidiennes et non euclidiennes, sont en fait des « descriptions équivalentes » des mêmes faits, les deux pouvant être vrais par rapport aux diverses « définitions de coordination » choisies arbitrairement. Cela représente un problème épistémologique dans le choix entre des théories concurrentes, entraînant un problème de sous-détermination théorique. Ainsi, Friedman affirme que la théorie de la relativité semble reposer sur une conception de « descriptions équivalentes » dérivée directement de la stratégie conventionnaliste.³⁰ Le développement de la théorie de la relativité est basé sur une méthodologie du point de vue du processus d'unification théorique.

Une décennie après l'émergence de la théorie générale de la relativité, on parlait d'une réduction de la physique à la géométrie,³¹ conduisant à des problèmes philosophiques distincts, de méthodologie mais aussi d'épistémologie et de métaphysique, ainsi que des problèmes techniques. Cette réduction implicite de la physique à la géométrie a été obtenue de manière

²⁷ Moritz Schlick, « Kritizistische Oder Empiristische Deutung der Neuen Physik? », *Société Française de Philosophie, Bulletin* 26, n° n/a (1921): 96.

²⁸ Hans Reichenbach, *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*, 1 Plate (De Gruyter, 1928).

²⁹ Michael Friedman, *Foundations of Space-Time Theories: Relativistic Physics and Philosophy of Science* (Princeton University Press, 1983).

³⁰ Friedman.

³¹ Oliver Lodge, « The Geometrisation of Physics, and Its Supposed Basis on the Michelson-Morley Experiment », *News, Nature*, 1921, 795–802, <https://doi.org/10.1038/106795a0>.

cruciale dans le cadre épistémologique de ce que Hilbert appelait la « méthode axiomatique ». ³²

Après avoir terminé la relativité générale, Einstein a tenté de développer une théorie qui unifie la gravité et l'électromagnétisme, en généralisant la géométrie riemannienne ou en ajoutant des dimensions supplémentaires, mais en excluant la réduction de la physique à la géométrie. ³³ Jusqu'en 1925, il a inventé les premières « théories de champ unifiées » géométriques. ³⁴ Aucun de ces efforts n'a été couronné de succès. Dans son programme de recherche pour l'unification géométrique, la méthodologie de recherche d'Einstein a subi un changement radical, ³⁵ s'appuyant de plus en plus sur « des considérations d'esthétique mathématique, de simplicité logique et d'inévitabilité de certaines structures mathématiques sous diverses contraintes, adoptées essentiellement pour des raisons philosophiques. » ³⁶

Le mathématicien Hermann Weyl, en 1918, a tenté de reconstruire la théorie d'Einstein sur la base de l'épistémologie de la « géométrie infinitésimale pure ». ³⁷

En décembre 1921, l'Académie de Berlin a publié la nouvelle proposition de Theodore Kaluza sur l'unification de la gravité et de l'électromagnétisme sur la base d'une géométrie riemannienne à cinq dimensions.

Toutes les tentatives de géométrisation de la physique dans le programme unifié ont accepté la capacité des mathématiques à comprendre la structure fondamentale du monde extérieur. Ainsi, le programme du champ géométriquement unifié semble ainsi s'inscrire dans une forme de réalisme scientifique appelé « réalisme structurel », avec une teinte platonicienne. Une forme de « réalisme structurel » suppose que peu importe le caractère intrinsèque ou la nature du

³² K. A. Brading et T. A. Ryckman, « Hilbert's 'Foundations of Physics': Gravitation and electromagnetism within the axiomatic method », *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39, n° 1 (1 janvier 2008): 102–153, <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2007.08.002>.

³³ Marco Giovanelli, « The Forgotten Tradition: How the Logical Empiricists Missed the Philosophical Significance of the Work of Riemann, Christoffel and Ricci », *Erkenntnis* 78, n° 6 (1 décembre 2013): 1219–1257, <https://doi.org/10.1007/s10670-012-9407-2>.

³⁴ Tilman Sauer, « Einstein's Unified Field Theory Program », *The Cambridge Companion to Einstein*, mai 2014, 281–305, <https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.011>.

³⁵ Ryckman, *Einstein*, chap. 9, 10.

³⁶ Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

³⁷ Hermann Weyl, Axel Hildebrand, et Dieter Schmalstieg, *Raum. Zeit. Materie: Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie*, 7. (Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo: Springer, 1988), 115–16.

monde physique, seule sa structure peut être connue. Cette version a été soutenue par Russell, qui a inclus la théorie générale de la relativité dans ce cadre.³⁸

Dans sa forme contemporaine, le réalisme structurel a une forme à la fois épistémique et « ontique », selon laquelle les caractéristiques structurelles du monde physique sont ontologiquement fondamentales.³⁹ Thomas A. Ryckman affirme que les théories d'unification géométrique correspondent à ce type de réalisme. Pour Weyl et Eddington, « l'unification géométrique était une tentative d'harmoniser la théorie de la gravité d'Einstein dans une nouvelle lumière épistémologique et explicative, en affichant les lois du champ de gravité et de l'électromagnétisme dans le cadre commun d'un observateur représenté géométriquement - une réalité indépendante ». ⁴⁰

En ce qui concerne la géométrisation de la physique, il y a eu une controverse permanente sur les conventions scientifiques⁴¹ et sur le fait que le choix de la géométrie soit empirique, conventionnel ou *a priori*. Duhem⁴² déclare que les hypothèses ne peuvent pas être testées isolément, mais seulement dans le cadre de la théorie dans son ensemble (holisme théorique et sous-détermination du choix de la théorie par des preuves empiriques). Dans une adresse en 1918 à Max Planck, Einstein a déclaré de sous-détermination :

« La tâche suprême du physicien est ... la recherche des lois élémentaires les plus générales à partir desquelles l'image du monde doit être obtenue par déduction pure. Aucun chemin logique ne mène à ces lois élémentaires ; seule l'intuition est fondée sur une compréhension empathique de l'expérience. Dans cet état d'incertitude méthodologique, on peut penser que de nombreux systèmes équivalents de principes théoriques sont possibles ; et cette opinion est, en principe, certainement correcte. Mais le développement de la physique a montré que, de toutes les constructions théoriques imaginables, une seule, à un moment donné, s'est révélée supérieure inconditionnellement à toutes les autres. Aucun de ceux qui se sont penchés sur ce sujet ne niera que, dans la pratique, le monde des perceptions détermine sans équivoque le système théorique, même si aucune voie logique ne mène des perceptions aux principes fondamentaux de la théorie. » ⁴³

Einstein considèrait que le réel physique implique exclusivement ce qui peut être construit à partir des coïncidences espace-temps, les points espace-temps étant considérés comme des

³⁸ Bertrand Russell, *The Analysis of Matter*, First Paperback Edition edition (Nottingham: Spokesman Books, 2007), 395.

³⁹ Pierre Maurice Marie Duhem, Jules Vuillemin, et Louis de Broglie, *The Aim and Structure of Physical Theory*, trad. par Philip P. Wiener, 9932nd edition (Princeton: Princeton University Press, 1991).

⁴⁰ Ryckman, « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ».

⁴¹ Paul Arthur Schilpp, éd., *Albert Einstein, Philosopher-Scientist: The Library of Living Philosophers Volume VII*, 3rd edition (La Salle, Ill.: Open Court, 1998).

⁴² Duhem, Vuillemin, et Broglie, *The Aim and Structure of Physical Theory*.

⁴³ Albert (Author) Einstein, « Motive des Forschens. », 1918, 31, <http://alberteinstein.info/vufind1/Record/EAR000079148>.

intersections des lignes de l'univers (« l'argument point-coïncidence »).⁴⁴ Les coïncidences ont donc un rôle ontique privilégié car elles sont invariables et donc uniquement déterminées.⁴⁵ La force du RG est également « géométrisée ». ⁴⁶ La métrique espace-temps dans RG est réductible au comportement des entités matérielles (horloges, faisceaux lumineux, géodésiques, etc.). ⁴⁷ Il s'avère que la mesure dépend des instruments de mesure choisis comme étalons, et les relations métriques impliquent les étalons choisis.

Paul Feyerabend considère Einstein comme un adepte « opportunist ou cynique », respectivement un anarchiste, de la méthodologie.⁴⁸ Arthur Fine déclare qu'Einstein adopte une vision proche de l'attitude ontologique naturelle.⁴⁹ van Frassen considérait Einstein comme un empiriste constructif.⁵⁰ Nicholas Maxwell déclare que l'empirisme axé sur le but, en tant que nouvelle méthode de découverte, est la vision mature de la science d'Einstein pour surmonter une grave crise scientifique :⁵¹ la disparition de la physique classique à la suite de la théorie quantique de Planck de 1900. L'empirisme axé sur le but prétend que la science émet des hypothèses permanentes sur la nature de l'univers, indépendamment des considérations empiriques.

Popper,⁵² Kuhn⁵³ et Lakatos⁵⁴ défendent des versions de l'empirisme standard dans le cas d'Einstein.

⁴⁴ Don A. Howard, « Einstein's Philosophy of Science », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Fall 2017 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017), <https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/einstein-philsience/>.

⁴⁵ Nicolae Sfetcu, *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale* (MultiMedia Publishing, 2018), <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.17470.18242>.

⁴⁶ Adolf Grünbaum, *Philosophical Problems of Space and Time: Second, Enlarged Edition* (Springer Science & Business Media, 2012).

⁴⁷ Paul Feyerabend, *Against Method* (London: New Left Books, 1975).

⁴⁸ Michael Esfeld et Vincent Lam, « Moderate Structural Realism About Space-Time », *Synthese* 160, n° 1 (2008): 18, 56-57, 213n.

⁴⁹ Arthur Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory* (University of Chicago Press, 1986), 9.

⁵⁰ Fine, 108.

⁵¹ Nicholas Maxwell, *Karl Popper, Science and Enlightenment* (London: UCL Press, 2017).

⁵² Karl Popper, *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*, 2nd edition (London ; New York: Routledge, 2002).

⁵³ Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, 3rd edition (Chicago, IL: University of Chicago Press, 1996).

⁵⁴ Imre Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers* (Cambridge University Press, 1980).

Vincent Lam et Michael Esfeld soutiennent le concept de réalisme structurel ontique (RSO), dans lequel « l'espace-temps est une structure physique formée par des réseaux de relations physiques entre des objets physiques qui ne possèdent pas d'identité intrinsèque indépendamment des relations dans lesquelles ils se trouvent », ⁵⁵ qui peut prendre en compte les caractéristiques fondamentales de la RG de l'invariance du difféomorphisme⁵⁶ et de l'indépendance du fond⁵⁷. La localisation au sein du RSO est dynamique et indépendante du fond, étant difféomorphe invariante, codant ainsi bien la caractéristique de la RG de l'indépendance du fond.

Selon Don A. Howard, « la philosophie d'Einstein est une synthèse originale d'éléments extraits de diverses sources, telles que le néo-kantianisme, le conventionnalisme et l'empirisme logique, sa caractéristique distinctive étant son mélange romanesque de réalisme avec une forme holistique sous-déterministe de conventionnalisme. » ⁵⁸

Il y a quelques idées centrales dans la philosophie d'Einstein :

- Sous-détermination de l'option théorique par des preuves
- Simplicité et le choix de la théorie
- Univocité dans la représentation théorique de la nature
- Réalisme et séparabilité
- Distinction entre les théories des principes et les théories constructives.

Pour Einstein, la *simplicité* est le critère principal du choix théorique lorsque les expériences et observations ne donnent pas d'indications suffisamment claires. ⁵⁹ L'*univocité* dans la représentation théorique de la nature ne doit pas être confondue avec un déni de la thèse de la *sous-détermination*. Le principe d'univocalité a joué un rôle central dans la formulation d'Einstein de la relativité générale, y compris dans l'élaboration de « l'argument du trou » considéré comme erroné par certains physiciens. ⁶⁰

De nombreux philosophes et scientifiques considèrent que la contribution la plus importante d'Einstein à la philosophie des sciences était la distinction qu'il faisait entre les théories des principes et les théories constructives. Selon Einstein, une *théorie constructive* offre un modèle constructif pour les phénomènes d'intérêt. Une *théorie des principes* consiste en un ensemble

⁵⁵ Vincent Lam et Michael Esfeld, « The Structural Metaphysics of Quantum Theory and General Relativity », *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 43, n° 2 (2012): 243–258.

⁵⁶ Le difféomorphisme est une cartographie bijective et lisse entre des variétés différenciées dont l'inversion est également lisse.

⁵⁷ Esfeld et Lam, « Moderate Structural Realism About Space-Time ».

⁵⁸ Howard, « Einstein's Philosophy of Science ».

⁵⁹ John Norton, *How Einstein Found His Field Equations: 1912-1915*, 1984, 21, 23.

⁶⁰ P. M. Harman et Peter Michael Harman, *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell* (Cambridge University Press, 2001).

de généralisations empiriques de haut niveau individuel bien confirmé. Einstein déclare que la compréhension finale nécessite une théorie constructive, mais les progrès de la théorie peuvent être « entravés par des tentatives prématurées de développer des théories constructives en l'absence de contraintes suffisantes pour restreindre un éventail de possibilités constructives. » Le rôle des théories fondées sur des principes est de fournir des contraintes, et le progrès est réalisé sur la base de tels principes. *Einstein déclare que c'était sa méthodologie pour découvrir la théorie de la relativité comme théorie principale, les deux autres principes étant le principe de la relativité et le principe de la lumière.*

Notez la similitude entre l'idée des « théories des principes » en tant que contraintes d'Einstein et le « noyau dur » de Lakatos (heuristique négative) qui aurait été la somme des « théories des principes » d'Einstein.

La distinction entre les théories de principe et les théories constructives a joué un rôle explicite dans la pensée d'Einstein. Harman a noté que des versions primitives de cette distinction étaient utilisées depuis le 19e siècle par James Clerk Maxwell.⁶¹

Les équations d'Einstein sont difficiles à résoudre exactement, mais il existe actuellement plusieurs solutions exactes, telles que la solution de Schwarzschild, la solution de Reissner-Nordström et la métrique Kerr, chacune correspondant à un certain type de trou noir dans un univers par ailleurs vide,⁶² et les univers de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker et de Sitter, chacun décrivant un cosmos en expansion.⁶³ D'autres solutions exactes incluent l'univers Gödel (avec la possibilité de voyager dans l'espace-temps), la solution Taub-NUT (un univers homogène mais anisotrope) et l'espace anti-de Sitter (avec la conjecture de Maldacena)⁶⁴. En raison de la difficulté de ces équations, des solutions sont actuellement recherchées par intégration numérique sur ordinateur ou par l'examen des petites perturbations de solutions exactes. A partir des solutions approximatives trouvées par les théories des perturbations fait également partie l'extension post-newtonienne, développée par Einstein, avec une distribution de matière qui se déplace lentement par rapport à la vitesse de la lumière. Une caractéristique particulière de cette extension est le *formalisme post-newtonien paramétré*, qui permet des comparaisons quantitatives entre les prédictions de la relativité générale et les théories alternatives.

⁶¹ Subrahmanyan Chandrasekhar, *The Mathematical Theory of Black Holes* (Clarendon Press, 1998).

⁶² Jayant Vishnu Narlikar, *Introduction to Cosmology* (Jones and Bartlett, 1983).

⁶³ Albert Einstein, *The Principle of Relativity* (S.l.: BN Publishing, 2008), 78.

⁶⁴ Stephen W. Hawking et al., *The Large Scale Structure of Space-Time*, New Ed edition (Cambridge: Cambridge University Press, 1975).

En imposant la covariance générale, toutes les vérifications spatio-temporelles supposent une détermination des coïncidences spatio-temporelles.⁶⁵ Schlick déclare que le passage de l'article d'Einstein de 1916 traitant cet aspect représente la naissance de la distinction observation/théorie moderne et le début d'interprétations empiriques et véridiques du positivisme ultérieur.⁶⁶

Einstein espérait que la relativité générale étendrait la relativité du mouvement de l'équivalence galiléenne à l'équivalence de tous les états de mouvement, y compris la rotation, sur la base de l'hypothèse que la covariance générale ou l'équivalence des descriptions de coordonnées garantit l'équivalence souhaitée. Mais en soi, la covariance générale n'est pas un tel argument, incapable de résoudre le problème originel de la relation d'Einstein entre le mouvement. Ce problème est, par essence, un problème de structure géométrique.⁶⁷ Selon Disalle, Einstein a fait une confusion épistémologique en acceptant l'idée que les mouvements relatifs peuvent être connus indépendamment de toute théorie spatiale, pour permettre aux mouvements relatifs d'avoir une position épistémologiquement privilégiée. Disalle conclut que le relationnalisme classique, considéré comme une critique épistémologique de la théorie de l'espace-temps, est lui-même une théorie spatiale.

Riemann (1867) et Helmholtz (1870) ont déclaré que toutes les mesures géométriques dépendent des hypothèses physiques sous-jacentes à la méthode de mesure, car une géométrie empirique doit postuler non seulement une structure géométrique, mais aussi une représentation d'un processus physique idéalisé.⁶⁸ Pour Riemann, le lien entre la géométrie et la physique devra être basé sur des objets physiques et des processus plus compliqués. Une telle connexion implique un principe physique, une idée reprise par Einstein pour la courbure de l'espace-temps.⁶⁹

Poincaré a affirmé que toute mesure peut s'accorder avec n'importe quelle géométrie, si l'on élimine les écarts par l'hypothèse d'une force de distorsion qui affecte les instruments de mesure.⁷⁰ Reichenbach et Schlick ont systématisé ce concept par la notion de « définition coordonnée

⁶⁵ A. Einstein, « The foundation of the general theory of relativity », in *The Principle of Relativity*. Dover Books on Physics. June 1, 1952. 240 pages. 0486600815, p. 109-164, 1952, 117, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1952prel.book..109E>.

⁶⁶ Moritz Schlick, *Space and Time in Contemporary Physics: An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation* (Mineola, N.Y: Dover Publications, 2005).

⁶⁷ Robert Disalle, « Spacetime Theory as Physical Geometry », *Erkenntnis* 42, n° 3 (1995): 317–337.

⁶⁸ Bernhard Riemann et Hermann Weyl, *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1919), 133-52, <https://www.springer.com/gp/book/9783662423165>.

⁶⁹ Albert Einstein, *Geometrie und Erfahrung: Erweiterte Fassung des Festvortrages gehalten an der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 27. Januar 1921* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1921), 123-30, <https://www.springer.com/de/book/9783642499036>.

⁷⁰ Henri Poincaré, *The Foundations of Science; Science and Hypothesis, the Value of Science, Science and Method* (Place of publication not identified: TheClassics.us, 2013), 81-84.

», orientant l'empirisme vers le conventionnalisme, avec une géométrie avec des définitions qui mettent en corrélation les concepts fondamentaux avec un objet donné empirique.^{71 72} Ainsi, Reichenbach a déclaré que : « la signification philosophique de la théorie de la relativité réside ... dans le fait qu'elle a démontré la nécessité de définitions de coordinateurs métriques à plusieurs endroits où des relations empiriques ont été précédemment supposées. »⁷³

Un exemple de ceci est la simultanéité. La physique newtonienne considérait la simultanéité des événements comme un fait empirique, tandis qu'Einstein imposait la simultanéité comme principe physique. La vitesse de la lumière étant considérée comme invariante, il s'est avéré que la simultanéité est relative. Disalle affirme que la définition d'Einstein de la simultanéité est circulaire, car elle implique déjà un principe de mesure du temps. Einstein a nié, affirmant que la définition n'impliquait rien à propos de la lumière, l'invariance de la vitesse de la lumière n'étant pas une hypothèse, mais « une disposition que je peux faire librement, afin d'obtenir une définition de la simultanéité ».⁷⁴ Disalle conclut que le problème de la nature de l'espace-temps n'est pas de savoir si une entité théorique fournit une explication causale aux apparences, mais si les processus de mesure physiques sont conformes aux lois géométriques. En conclusion, Reichenbach nie le rôle de la géométrie dans l'explication de la cause profonde des relations spatiales.⁷⁵

Mais Einstein relie l'espace-temps non seulement à une certaine procédure, mais à un système de lois naturelles, les lois de l'électrodynamique, qu'il considère comme des invariants fondamentaux. Ainsi, la définition coordonnée des états de mouvement est un processus plus subtil que Reichenbach a proposé, impliquant de ne pas choisir un cadre de repos mais d'établir les lois du mouvement. Dans la pratique, les lois du mouvement sont ainsi devenues, à travers des définitions coordinatives, postulées de la géométrie espace-temps.⁷⁶

Selon Lakatos, la théorie d'Einstein n'est pas meilleure que celle de Newton à cause de la réfutation de la théorie de Newton : il y a des « anomalies » aussi dans la théorie d'Einstein. Mais cela représente un progrès par rapport à la théorie de Newton, car il a expliqué tout ce qui expliquait avec succès la théorie de Newton, et a également expliqué les anomalies de cette théorie. De plus, il a prédit avec succès des événements dont la théorie de Newton ne disait rien.

⁷¹ Hans Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time*, 1st edition (New York, NY: Dover Publications, 1957).

⁷² Moritz Schlick, *Allgemeine Erkenntnislehre: Abteilung I / Band 1*, éd. par Hans Jürgen Wendel et Fynn Ole Engler, Abteilung I: Veröffentlichte Schriften (Wien: Springer-Verlag, 2009), <https://www.springer.com/gp/book/9783211327685>.

⁷³ Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time*, 15.

⁷⁴ Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, 15.

⁷⁵ Disalle, « Spacetime Theory as Physical Geometry ».

⁷⁶ Disalle.

Bibliographie

- Bollert, Karl. *Einstein's Relativitätstheorie und ihre Stellung im System der Gesamterfahrung*. T. Steinkopf, 1921.
- Brading, K. A., et T. A. Ryckman. « Hilbert's 'Foundations of Physics': Gravitation and electromagnetism within the axiomatic method ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39, n° 1 (1 janvier 2008): 102-53. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2007.08.002>.
- Cassirer, Ernst. *Zur Einstein'schen relativitätstheorie: Erkenntnistheoretische betrachtungen*. B. Cassirer, 1921.
- Cassirer, Ernst, W. C. Swabey, et M. C. Swabey. *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity*. Courier Corporation, 2003.
- Chandrasekhar, Subrahmanyan. *The Mathematical Theory of Black Holes*. Clarendon Press, 1998.
- Disalle, Robert. « Spacetime Theory as Physical Geometry ». *Erkenntnis* 42, n° 3 (1995): 317–337.
- Duhem, Pierre Maurice Marie, Jules Vuillemin, et Louis de Broglie. *The Aim and Structure of Physical Theory*. Traduit par Philip P. Wiener. 9932nd edition. Princeton: Princeton University Press, 1991.
- Einstein, A. « The foundation of the general theory of relativity ». In *The Principle of Relativity. Dover Books on Physics. June 1, 1952. 240 pages. 0486600815, p. 109-164, 109-64, 1952*. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1952prel.book..109E>.
- Einstein, Albert. « Autobiographische Skizze ». In *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, édité par Carl Seelig, 9-17. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956. https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2.
- . *Geometrie und Erfahrung: Erweiterte Fassung des Festvortrages Gehalten an der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 27. Januar 1921*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1921. <https://www.springer.com/de/book/9783642499036>.
- . *The Principle of Relativity*. S.l.: BN Publishing, 2008.
- . *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*. 23. Aufl. 2001. Nachdruck. Berlin: Springer, 2002.
- Einstein, Albert (Author). « Motive des Forschens. », 1918. <http://alberteinstein.info/vufind1/Record/EAR000079148>.
- Esfeld, Michael, et Vincent Lam. « Moderate Structural Realism About Space-Time ». *Synthese* 160, n° 1 (2008): 27–46.
- Feyerabend, Paul. *Against Method*. London: New Left Books, 1975.
- Fine, Arthur. *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*. University of Chicago Press, 1986.
- Friedman, Michael. *Foundations of Space-Time Theories: Relativistic Physics and Philosophy of Science*. Princeton University Press, 1983.
- . « Geometry, Convention, and the Relativized A Priori: Reichenbach, Schlick, and Carnap ». *Reconsidering Logical Positivism*, juillet 1999. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139173193.006>.
- Giovanelli, Marco. « The Forgotten Tradition: How the Logical Empiricists Missed the Philosophical Significance of the Work of Riemann, Christoffel and Ricci ». *Erkenntnis* 78, n° 6 (1 décembre 2013): 1219-57. <https://doi.org/10.1007/s10670-012-9407-2>.
- Grünbaum, Adolf. *Philosophical Problems of Space and Time: Second, Enlarged Edition*. Springer Science & Business Media, 2012.

- Harman, P. M., et Peter Michael Harman. *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*. Cambridge University Press, 2001.
- Hawking, Stephen W., G. F. R. Ellis, P. V. Landshoff, D. R. Nelson, D. W. Sciama, et S. Weinberg. *The Large Scale Structure of Space-Time*. New Ed edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1975.
- Howard, Don A. « Einstein's Philosophy of Science ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Fall 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. <https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/einstein-philsience/>.
- Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions*. 3rd edition. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1996.
- Lakatos, Imre. *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume I: Philosophical Papers*. Cambridge University Press, 1980.
- Lam, Vincent, et Michael Esfeld. « The Structural Metaphysics of Quantum Theory and General Relativity ». *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 43, n° 2 (2012): 243–258.
- Lodge, Oliver. « The Geometrisation of Physics, and Its Supposed Basis on the Michelson-Morley Experiment ». *News. Nature*, 1921. <https://doi.org/10.1038/106795a0>.
- Maxwell, Nicholas. *Karl Popper, Science and Enlightenment*. London: UCL Press, 2017.
- Narlikar, Jayant Vishnu. *Introduction to Cosmology*. Jones and Bartlett, 1983.
- Natorp, Paul. *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*. Sändig Reprint, H. R. Wohlwend, 1910.
- Norton, John. *How Einstein Found His Field Equations: 1912-1915*, 1984.
- Norton, John D. « General Covariance and the Foundations of General Relativity: Eight Decades of Dispute ». *Reports of Progress in Physics* 56 (1993): 791–861.
- Petzoldt, Joseph, Giora Hon, et Ernst Mach. *Der Verhältnis der Machschen Gedankenwelt zur Relativitätstheorie, an appendix to Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt*. Xenomoi Verlag, 1921.
- Poincaré, Henri. *The Foundations of Science; Science and Hypothesis, the Value of Science, Science and Method*. Place of publication not identified: TheClassics.us, 2013.
- Popper, Karl. *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. 2nd edition. London ; New York: Routledge, 2002.
- Reichenbach, Hans. *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. 1 Plate. De Gruyter, 1928.
- . *Relativitätstheorie Und Erkenntnis Apriori*. J. Springer, 1920.
- . *The Philosophy of Space and Time*. 1st edition. New York, NY: Dover Publications, 1957.
- Riemann, Bernhard, et Hermann Weyl. *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1919. <https://www.springer.com/gp/book/9783662423165>.
- Russell, Bertrand. *Relativity: Philosophical Consequences, in Encyclopaedia Britannica: Thirteenth Edition Volume 31*. ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA PRESS, 1926.
- . *The Analysis of Matter*. First Paperback Edition edition. Nottingham: Spokesman Books, 2007.
- Ryckman, Thomas. « A Believing Rationalist ». *The Cambridge Companion to Einstein*, mai 2014. <https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.014>.
- . *Einstein*. 1 edition. London ; New York: Routledge, 2011.
- . *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915-1925*. 1 edition. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005.
- Ryckman, Thomas A. « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Spring 2018.

- Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018.
<https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/genrel-early/>.
- Sauer, Tilman. « Einstein's Unified Field Theory Program ». *The Cambridge Companion to Einstein*, mai 2014. <https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.011>.
- Schilpp, Paul Arthur, éd. *Albert Einstein, Philosopher-Scientist: The Library of Living Philosophers Volume VII*. 3rd edition. La Salle, Ill.: Open Court, 1998.
- Schlick, Moritz. *Allgemeine Erkenntnislehre: Abteilung I / Band 1*. Édité par Hans Jürgen Wendel et Fynn Ole Engler. Abteilung I: Veröffentlichte Schriften. Wien: Springer-Verlag, 2009. <https://www.springer.com/gp/book/9783211327685>.
- . « Kritizistische Oder Empiristische Deutung der Neuen Physik? » *Société Française de Philosophie, Bulletin* 26, n° n/a (1921): 96.
- . *Space and Time in Contemporary Physics: An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation*. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2005.
- Sellien, Ewald. *Die erkenntnistheoretische Bedeutung der Relativitätstheorie*. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1919.
- Weyl, Hermann, Axel Hildebrand, et Dieter Schmalstieg. *Raum. Zeit. Materie: Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie. 7*. Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo: Springer, 1988.