

# Heuristique du programme de la relativité générale

Nicolae Sfetcu

26.12.2019

Sfetcu, Nicolae, « Heuristique du programme de la relativité générale », SetThings (26 décembre 2019), URL = <https://www.setthings.com/fr/heuristique-du-programme-de-la-relativite-generale/>

Email: [nicolae@sfetcu.com](mailto: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/>

**BIBLIOGRAPHIE.....7**

Le principe essentiel de coordination dans la relativité générale (RG) est le principe d'équivalence, y compris une heuristique négative. L'argument « n'est pas que tous les cadres de référence sont équivalents, mais que la coordination classique d'un mouvement uniforme en ligne droite avec les chemins de particules sans force appliquée ne peut pas être réalisée sans ambiguïté ou inconsistance. »<sup>1</sup> Le principe d'équivalence stipule que la décomposition du mouvement gravitationnel en un mouvement uniforme et une accélération gravitationnelle ne peuvent pas être uniques, car la chute libre ne se distingue pas localement du mouvement uniforme. Cependant, une telle décomposition implique une violation de la covariance générale, car elle représente un choix arbitraire d'un système de coordonnées.<sup>2</sup> Pour tout système de coordonnées, si nous identifions ses lignes avec les lignes géodésiques, nous pouvons construire le champ gravitationnel afin que la différence entre ces géodésiques et les mouvements réels puisse être différenciée.<sup>3</sup>

La théorie de la relativité spéciale d'Einstein (RS) repose sur deux postulats fondamentaux : le postulat de la lumière (la vitesse de la lumière, dans le « cadre de repos », est indépendante de la vitesse de la source), et le principe de la relativité. Cette dernière a été explicitement adoptée par Einstein comme moyen de restreindre la forme des lois, quelle que soit leur structure détaillée. Ainsi, nous avons la différence entre une théorie « constructive » et une théorie « principale ». La théorie générale de la relativité a été développée en utilisant comme noyau un principe de symétrie : le principe de covariance générale.<sup>4</sup> Initialement, Einstein voyait le principe de la covariance générale comme une extension du principe de la relativité de la mécanique classique et de la RS. Pour Einstein, le principe de covariance générale était un postulat crucial dans le développement de la RG. La liberté du difféomorphisme de la RG (invariance de la forme des lois sous les transformations des coordonnées en fonction des fonctions arbitraires de l'espace et du temps) est une symétrie spatio-temporelle « locale », par opposition aux symétries spatio-temporelles « globales » de la RS (qui dépendent plutôt des paramètres constants).

Ces dernières années, il y a eu de nombreux débats en physique et philosophie concernant certains types de symétries agissant dans l'espace des théories. De telles symétries sont interprétées comme entraînant une « équivalence » entre deux théories qui seraient liées à une « symétrie duale » (dans le cas d'une « symétrie » au sens strict d'un automorphisme, elles sont

---

<sup>1</sup> Robert Disalle, « Spacetime Theory as Physical Geometry », *Erkenntnis* 42, n° 3 (1995): 317–337.

<sup>2</sup> 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, 114, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1952prel.book..109E>.

<sup>3</sup> Einstein, 142-43.

<sup>4</sup> Katherine Brading, Elena Castellani, et Nicholas Teh, « Symmetry and Symmetry Breaking », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, éd. par Edward N. Zalta, Winter 2017 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017), <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/symmetry-breaking/>.

appelées « auto-dualités »). Katherine Brading<sup>5</sup> illustre par les dualités entre les théories quantiques des champs (telles que la dualité magnétique / électrique généralisée), entre les théories des cordes (telles que les dualités T et S) et entre les descriptions physiques qui sont, comme une théorie des champs quantiques et une théorie des cordes, comme dans le cas des dualités jauge / gravité.<sup>6</sup> D'autres exemples sont la dualité position-quantité de mouvement, la dualité onde-particule, ou la dualité Kramers-Wannier du modèle d'Ising bidimensionnel en physique statistique. Les dualités sont des transformations entre les théories, tandis que la symétrie est une cartographie entre les solutions de la même théorie. Une symétrie peut être exacte (validité inconditionnelle), approximative (valable sous certaines conditions) ou rompue (selon l'objet considéré et son contexte). Les symétries ont fonctionné normativement, comme des contraintes, dans la covariance générale d'Einstein pour établir les équations de la relativité générale.

Elie Zahar a déclaré que le développement de la relativité d'Einstein était dû à ses vagues croyances métaphysiques, conformément à ses propres « prescriptions heuristiques » qui sont devenues un outil spécifique et puissant. Zahar déclare que la révolution scientifique de Kuhn ne s'applique pas au cas d'Einstein. Selon lui, deux « dispositifs heuristiques » ont conduit à la découverte de la théorie de la relativité : l'exigence interne de cohérence, et l'affirmation selon laquelle « puisque Dieu n'est pas trompeur, il ne peut y avoir d'accidents dans la nature ». Les symétries naturelles sont fondamentales au niveau ontologique, et la règle heuristique prime sur une théorie qui n'explique pas les symétries comme des manifestations plus profondes.<sup>7</sup>

Selon Newton, la gravité n'est pas une qualité primaire comme l'inertie ou l'impénétrabilité. Par conséquent, l'inertie et la gravité sont des propriétés indépendantes. Mais Newton déclare que la masse inertielle est égale à la masse gravitationnelle, sans expliquer la raison de cette identité (il y a une symétrie qui contredit l'indépendance des deux propriétés). Dans l'expérience de Michelson, en appliquant l'éther comme milieu universel, il s'avère qu'il est indétectable, ce qui est un paradoxe. Einstein a pris conscience de ce paradoxe. Il a éliminé l'asymétrie entre la gravité et l'inertie en proposant que tous les champs gravitationnels soient inertiels. Il avait également d'autres objections à la physique classique : la théorie électromagnétique de Lorentz faisait face à un dualisme entre des particules chargées discrètes régies par les lois de Newton et un champ continu qui respectait les équations de Maxwell; la relativité s'applique pour Lorentz à la mécanique, mais pas à l'électrodynamique; l'idée d'espace absolu (il y a un cadre inertielle privilégié), bien que son élimination n'influence pas la mécanique classique.

---

<sup>5</sup> Katherine Brading et Harvey R. Brown, « Symmetries and Noether's Theorems », in *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, éd. par Katherine A. Brading et Elena Castellani (Cambridge University Press, 2003), 89–109.

<sup>6</sup> Brading, Castellani, et Teh, « Symmetry and Symmetry Breaking ».

<sup>7</sup> Elie Zahar, « Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II) », *British Journal for the Philosophy of Science* 24, n° 3 (1973): 223–262.

Einstein a apprécié le principe de la relativité pour son universalité et son rôle unificateur pour la mécanique et l'électrodynamique, ceci étant le premier principe sur lequel a développé la théorie générale de la relativité. Le deuxième principe est celui de la lumière mais, épistémologiquement, le deuxième point de départ d'Einstein pour développer la théorie générale de la relativité n'était pas le principe de la lumière, mais l'idée que les équations de Maxwell sont covariantes et expriment une loi de la nature. Le principe de la lumière résulte de cette idée, tout comme le principe de la relativité, selon Zahar.<sup>8</sup>

En fait, Einstein avait le choix de développer une relativité générale basée sur les équations de Maxwell ou les lois de Newton. Mais dans le dualisme entre particules et champs, toutes les tentatives d'explication mécanique du comportement du champ ont échoué.

Selon Zahar, aucune expérience « cruciale » n'aurait pu être conçue entre la théorie de Lorentz et celle d'Einstein en 1905. Mais Minkowski et Planck ont abandonné le programme classique de relativité restreinte, contrairement à la méthodologie de Kuhn. De plus, Einstein était à cette époque un quasi-étranger, tandis que Lorentz était une autorité reconnue. Et la théorie de Lorentz a été très claire par rapport à celle d'Einstein qui impliquait une refonte majeure des notions d'espace et de temps. De plus, il n'y avait aucune anomalie que la théorie d'Einstein aurait mieux résolue que Lorentz. De plus, Lorentz lui-même était finalement convaincu de la nouvelle perspective.<sup>9</sup> Whittaker<sup>10</sup> considère Lorentz et Poincaré comme les vrais auteurs de la relativité restreinte, le mérite d'Einstein étant celui de développer la relativité générale. Ainsi, le programme éthérique de Lorentz n'a pas été vaincu par le programme de la relativité, mais il a été pratiquement développé en lui. Zahar le contredit, basé sur le fait que les deux programmes ont des heuristiques très différentes.<sup>11</sup>

Dans le cas de la révolution copernicienne, le programme platonique de modélisation du phénomène par des mouvements circulaires et sphériques a d'abord été couronné de succès, chaque planète se trouvant sur une véritable sphère physique cristalline en rotation axiale. Il a été découvert plus tard que la distance entre la terre et les planètes varie, de sorte que des hypothèses supplémentaires ont été faites à travers des excentricités, des épicycles et des écrans, pour expliquer les nouvelles observations. Lorsque l'on a essayé de déterminer le mouvement des corps célestes vers la terre en raison des mouvements inégaux, il est apparu des différences entre les phénomènes et les méthodes mathématiques qui ne permettaient que des mouvements circulaires avec la terre au centre de l'univers. Copernic, bien qu'il a considéré le soleil comme fixe, n'a pas résolu cette différence, recourant toujours aux épicycles. Kepler est celui qui a aboli les épicycles et a trouvé les lois du mouvement elliptique des planètes avec le Soleil dans un foyer. Lorentz a utilisé les transformations galiléennes, éliminant les épicycles mais donnant au cadre éthérique un statut privilégié. Tout comme Copernic était conscient de l'idéalisation

---

<sup>8</sup> Zahar.

<sup>9</sup> Zahar.

<sup>10</sup> Edmund Taylor Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity* (Harper, 1960).

<sup>11</sup> Zahar, « Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? »

de son modèle planétaire, Lorentz a compris par la suite que les coordonnées effectives, et non les coordonnées galiléennes, sont les quantités mesurées dans le cadre mobile. Einstein a abandonné les transformations galiléennes et a identifié les coordonnées réelles mesurées comme les seules réelles. L'heuristique d'Einstein est basée sur une exigence générale de covariance de Lorentz pour toutes les lois physiques, imposant le renoncement aux transformations galiléennes.

Zahar affirme que Lorentz et Einstein ont utilisé des heuristiques différentes dans leurs programmes de recherche.<sup>12</sup> Le programme éthérique a été essentiellement remplacé par un programme avec une plus grande puissance heuristique, c'est pourquoi Planck a abandonné la théorie de Lorentz en faveur d'Einstein juste avant que le programme d'Einstein ne devienne progressivement empirique. Les deux théories sont similaires en termes de « noyau dur » (heuristique négative), et peuvent être considérées comme des programmes bifurqués. C'est la différence entre l'heuristique positive qui a conduit au choix des scientifiques par le programme d'Einstein au début du siècle dernier. L'heuristique positive de Lorentz a consisté à fournir à l'éther des propriétés qui expliqueraient de nombreux phénomènes physiques, dont le champ électromagnétique et la mécanique newtonienne. Cette approche a permis un développement rapide du programme de Lorentz, mais à la fin du XIXe siècle, l'heuristique avait atteint un point de saturation. Un certain nombre de programmes dégénérés en tant que modèles mécaniques ont émergé pour résoudre les anomalies d'éther. Pour expliquer certains phénomènes électromagnétiques, Lorentz a introduit le postulat de l'éther au repos, mais les calculs ultérieurs ont contredit cette hypothèse.

Les différences entre les vues de Lorentz et d'Einstein étaient métaphysiques : Lorentz croyait que l'univers respecte les lois intelligibles (il y a un environnement propagé, un absolu « maintenant », etc.), tandis que pour Einstein l'univers est régi par des principes mathématiques cohérents (lois covariantes, etc.) Zahar déclare que toutes les révolutions scientifiques majeures ont été accompagnées d'une augmentation de la cohérence mathématique accompagnée d'une perte (temporaire) d'intelligibilité (l'astronomie newtonienne est plus cohérente que ptolémaïque, mais l'action à distance n'a pas été acceptée auparavant Newton, et puis accepté à la fin du XVIIIe siècle et à nouveau rejeté après Maxwell). Dans le programme de recherche de Lorentz, le comportement du champ électromagnétique était venu à dicter les propriétés de l'éther, même improbables (par exemple, l'éther au repos et agissant par des forces nettes nulles). En fait, la stratégie heuristique de Lorentz s'est inversée : au lieu de déduire une théorie de l'éther considéré comme fondamental, l'éther résulte en fonction du champ. L'heuristique d'Einstein était basée sur l'exigence que toutes les lois physiques soient Lorentz-covariantes (pour qu'elles prennent la même forme quel que soit le cadre de référence), et que la loi classique émerge de la nouvelle loi comme un cas à la limite.

Afin d'obtenir une théorie relativiste de la gravité, Einstein a maintenu le principe d'équivalence, décidé de traiter tous les systèmes de coordonnées de manière égale et d'imposer une condition de covariance générale à toutes les lois. Le succès empirique de la relativité générale par la

---

<sup>12</sup> Zahar.

prédiction correcte du comportement du périhélie de Mercure s'est révélé crucial pour le développement futur du programme.

Depuis 1905, le programme de la relativité s'est révélé supérieur heuristique par rapport au classique. Mais la relativité restreinte n'a pas réussi à surpasser le programme Lorentz. L'expérience de Bucherer<sup>13</sup> a confirmé les deux hypothèses, et l'expérience de Kaufmann<sup>14</sup> a nié les deux. Avant l'émergence de la relativité générale, la communauté scientifique parlait de la théorie de Lorentz-Einstein, les considérant comme équivalentes du point de vue d'un observateur. La relativité générale a réussi à remplacer empiriquement le programme de Lorentz en expliquant avec succès la « précession anormale » du périhélie de Mercure. Cette prédiction était un progrès empirique. De plus, la relativité générale s'est avérée plus falsifiable.

Nicholas Maxwell propose également une méthode pour l'unification de deux théories « qui se contredisent »<sup>15</sup>. La méthode qu'il propose pour établir la théorie unifiée est la suivante : parmi les deux théories, on choisit les éléments communs qui ne se contredisent pas, les éléments contradictoires sont supprimés, et sur cette base, la nouvelle théorie est développée. Il n'illustre pas suffisamment, à mon avis, quels seraient ces éléments communs dans le cas de la mécanique classique et de l'électrodynamique classique, considérés par tous les scientifiques comme deux théories contradictoires et dont est issue la théorie spéciale de la relativité. Aussi, Nicholas Maxwell impose l'existence d'une « hypothèse cruciale », dont la falsifiabilité permet l'acceptation de la théorie à la suite d'une méthode de découverte basée sur l'empirisme axé sur le but. Dans la physique d'aujourd'hui, il existe d'innombrables exemples de théories unificatrices (comme la théorie M qui proposent l'unification de toutes les forces fondamentales, y compris la gravité) qui n'avaient pas l'intention de devenir falsifiables par des « hypothèses cruciales ».

La relativité générale est le résultat de l'unification par Einstein de la théorie de la gravité universelle de Newton (avec l'action instantanée de la gravité à distance) et de la théorie spéciale de la relativité (avec la limitation de toute vitesse, à la valeur constante de la vitesse de la lumière,  $c$ ). Ces deux principes se contredisent. Ainsi, selon Maxwell, ils devraient être retiré de la future théorie unificatrice.

---

<sup>13</sup> A. H. Bucherer, « Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips », *Annalen der Physik* 333 (1909): 513-36, <https://doi.org/10.1002/andp.19093330305>.

<sup>14</sup> W. Kaufmann, « Über die Konstitution des Elektrons », *Annalen der Physik* 324 (1906): 949, <https://doi.org/10.1002/andp.19063240303>.

<sup>15</sup> Nicholas Maxwell, *Karl Popper, Science and Enlightenment* (London: UCL Press, 2017).

## Bibliographie

- Brading, Katherine, et Harvey R. Brown. « Symmetries and Noether's Theorems ». In *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, édité par Katherine A. Brading et Elena Castellani, 89. Cambridge University Press, 2003.
- Brading, Katherine, Elena Castellani, et Nicholas Teh. « Symmetry and Symmetry Breaking ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/symmetry-breaking/>.
- Bucherer, A. H. « Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips ». *Annalen der Physik* 333 (1909): 513-36. <https://doi.org/10.1002/andp.19093330305>.
- Disalle, Robert. « Spacetime Theory as Physical Geometry ». *Erkenntnis* 42, n° 3 (1995): 317–337.
- 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>.
- Kaufmann, W. « Über die Konstitution des Elektrons ». *Annalen der Physik* 324 (1906): 487-553. <https://doi.org/10.1002/andp.19063240303>.
- Maxwell, Nicholas. *Karl Popper, Science and Enlightenment*. London: UCL Press, 2017.
- Whittaker, Edmund Taylor. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Harper, 1960.
- Zahar, Elie. « Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II) ». *British Journal for the Philosophy of Science* 24, n° 3 (1973): 223–262.