

Avant-Propos

EN septembre 2011, après avoir publié un livre d'optique¹, fruit de cinq années de travail intensif, je recommence à jouer au tennis, au tennis club de Vanves. J'y fais la connaissance de David Langlois, directeur de recherche au CNRS et spécialiste de l'astrophysique relativiste et de la cosmologie primordiale, avec qui je joue depuis régulièrement. David, qui enseignait à l'époque la relativité restreinte et la relativité générale à l'École Polytechnique vient juste de publier un premier ouvrage, sur la relativité restreinte². Deux ans plus tard, il en publie un second sur la relativité générale³, dont il m'offre un exemplaire dédié. Ce livre restera dans ma bibliothèque jusqu'en janvier 2016.

À cette époque, j'ai l'idée d'un second livre, pluridisciplinaire et grand public, dont l'objet serait d'exposer quelques grandes théories auxquelles sont attachés les noms de savants célèbres : Darwin et la théorie de l'évolution, Pasteur et la théorie des germes et ferments, Gauss et la théorie des nombres, Einstein et la théorie de la relativité générale... Je me fais alors la réflexion qu'il ne serait pas envisageable d'exposer la théorie d'Einstein, même à un niveau élémentaire, sans avoir moi-même une maîtrise approfondie de son formalisme mathématique. Un matin, je me dirige donc vers ma bibliothèque où je m'empare de l'ouvrage de David Langlois. C'est ainsi qu'a démarré ce projet de livre, autour d'une petite sphère jaune plongée dans un univers à trois dimensions...

Au début, je m'étais fixé comme objectif d'écrire un article d'une trentaine de pages pour le Bulletin de l'Union des Physiciens (B.U.P) – périodique destiné aux enseignants du collège et du lycée – pour exposer de manière synthétique et pédagogique les fondements de la théorie de la relativité générale. Je me suis vite aperçu qu'un tel projet était illusoire, tant la quantité de concepts et d'outils mathématiques à introduire était conséquente. Au final, j'aboutis après une dizaine de mois à un exposé du formalisme actuel de la relativité générale d'environ quatre-vingts pages.

1. Houard S., *Optique, Une approche expérimentale et pratique*, Éd. deboeck, juin 2011.

2. Langlois D., *Relativité restreinte*, Éd. Vuibert, 2011.

3. Langlois D., *Relativité générale*, Éd. Vuibert, 2013.

J'étais cependant interpellé par le constat suivant : dans la plupart des ouvrages de relativité générale, l'espace-temps est décrit d'emblée comme une variété de dimension quatre, pourvue du cadre de la géométrie riemannienne et du calcul différentiel absolu qui lui est associé. Je me posais alors la question suivante : partant du cadre lorentzien de la relativité restreinte et de la gravitation newtonienne, comment Einstein en était-il arrivé à adopter ce nouveau cadre spatio-temporel non euclidien, adapté à sa nouvelle théorie de la gravitation ?

Je me plongeai dès lors dans une seconde approche, celle de la genèse de la théorie de la relativité générale. À la lecture d'un certain nombre d'articles, je m'aperçus rapidement qu'une équipe d'historiens des sciences, regroupée autour de John Stachel, Jürgen Renn – directeur de l'institut Max Planck pour l'histoire des sciences à Berlin – John Norton, Michel Janssen et Tilman Sauer avait mené, depuis les années 1980 un travail d'exégèse extrêmement approfondi de l'ensemble des écrits d'Einstein sur la relativité générale. Ce travail a débouché, en 2007, sur la publication d'un ouvrage monumental en quatre volumes et 2072 pages, édité par Jürgen Renn, intitulé *The Genesis of General Relativity*⁴. De plus, sous l'impulsion de John Stachel et du projet *Einstein Papers Project*, tous les écrits scientifiques ainsi que la correspondance scientifique et privée d'Albert Einstein ont été publiés depuis 1987 dans un ensemble de 17 volumes (fin 2024) intitulé *The Collected Papers of Albert Einstein* ou CPAE. Les différents volumes des CPAE sont consultables en ligne sur le site de l'Université de Princeton⁵ ou peuvent être commandés en version papier, soit en allemand, soit en anglais⁶.

Outre les articles publiés par Einstein, deux documents ont joué un rôle particulièrement important pour lever les nombreuses zones d'ombre sur la genèse de la théorie. Le premier est le « carnet de Zurich », retrouvé parmi les documents d'Einstein à Princeton après sa mort en avril 1955, et qui renferme les premières tentatives d'Einstein pour trouver des équations de champ généralement covariantes de la gravitation. Le second est le manuscrit Einstein-Besso, porté à la connaissance de Robert Schulmann – directeur du projet *Einstein Papers* – en 1988. Il renferme les premiers calculs de l'avance anormale du périhélie de Mercure à partir des équations de champ de l'*Entwurf*, une théorie intermédiaire de la gravitation publiée en mai 1913 par Einstein et Grossmann. Ces deux documents ont apporté un éclairage historique et technique crucial sur la transition entre la théorie incomplète de l'*Entwurf* et la théorie finale, publiée entre le 4 et le 25 novembre 1915. Grâce à ce travail remarquable d'édition et d'exégèse, on dispose désormais

4. Renn J. (Ed.), *The Genesis of General Relativity*, Vol. 1 à 4, Springer 2007.

5. <https://einsteinpapers.press.princeton.edu>

6. Les archives d'Albert Einstein, auparavant conservées à l'Université de Princeton, où Einstein travailla jusqu'à sa mort en 1955, ont été transférées à l'Université hébraïque de Jérusalem.

d'un scénario relativement fiable et précis de la genèse de la théorie de la relativité générale, même s'il subsiste quelques points d'achoppements entre les historiens eux-mêmes. De plus, contrairement au mythe trop souvent répandu, il s'avère que la relativité générale n'est pas l'œuvre d'un génie isolé. Au cours des huit années nécessaires à l'élaboration de sa nouvelle théorie, Albert Einstein a pu bénéficier de collaborations ponctuelles avec ses amis Michele Besso et Marcel Grossmann, ainsi qu'avec le Suédois Gunnar Nordström. Il a aussi su tirer parti des échanges d'idées avec les scientifiques de son temps, Max Laue, Max Abraham, Gunnar Nordström, Erwin Freundlich, Max Born, Max Planck, Paul Ehrenfest, Wilhelm Wien, Tullio Levi-Civita, Hendrik A. Lorentz, Heinrich Zangger, Willem de Sitter, Felix Klein, Arnold Sommerfeld, Hermann Weyl, Karl Schwarzschild et David Hilbert, son plus sérieux concurrent, comme en atteste sa correspondance fournie.

Cependant, la genèse de la relativité générale s'avère extrêmement complexe, tant du point de vue technique qu'historique. De plus, si l'ouvrage phare de Jürgen Renn et al. *The Genesis of General Relativity*, couvre de manière détaillée tous les pans de cette genèse, y compris une analyse page par page du contenu du carnet de Zurich et l'exposé de théories alternatives à celle d'Einstein, il est constitué principalement d'une compilation d'articles de recherche souvent longs et pointus et ses 2072 pages ont de quoi réfréner les ardeurs des lecteurs les plus motivés⁷. Comme le dit Anne Knox, qui fit la *review* de cet ouvrage lors de sa parution en 2007 *Clearly, these volumes are not for the weak of heart (nor for the small of purse). But the effort to delve deep into the various essays is worth it*, « Clairement, ces volumes ne sont pas pour les cœurs sensibles (ni pour les petites bourses) [l'ouvrage coûte dans les 1200 dollars!]. Mais l'effort pour approfondir les différents essais en vaut la peine ». La biographie d'Albert Einstein *Subtle is the Lord*⁸, écrite en 1982 par Abraham Pais, un physicien qui a connu personnellement Einstein, offre certes une approche historique et technique de l'œuvre d'Einstein plus abordable, mais la genèse de la relativité générale n'en constitue qu'une partie et n'y est pas restituée comme un tout cohérent et avec une aussi grande acuité. Enfin, d'autres historiens des sciences, comme Jean Eisenstaedt, ont opté pour un exposé plus philosophique des idées d'Einstein, et n'abordent pas les traitements techniques⁹.

7. Le summum en termes d'exégèse et de difficulté technique est sans doute l'article Janssen M. and Renn J., *Untying the knot : How Einstein found His Way Back to Field Equations Discarded in the Zurich Notebook*, In : Jürgen Renn (Ed.), *The Genesis of General Relativity*, Vol. 2, *General Relativity in the Making : Zurich Notebook. Part II*, Springer 2007, p. 839-925.

8. Pais A., *Subtle is the Lord, The science and life of Albert Einstein*, Oxford University Press, second Edition, 2005.

9. Eisenstaedt J., *Einstein et la relativité générale*, CNRS Éditions, coll. Biblis, 2013.

Or un premier constat s'impose : nul ne peut maîtriser et apprécier pleinement la précision et la puissance des prédictions de la théorie de la relativité générale sans avoir fait l'effort d'assimiler les mathématiques sous-jacentes, notamment la manipulation des tenseurs et le calcul différentiel absolu de Riemann. C'est ce même effort auquel Einstein a dû lui-même consentir pour maîtriser ces nouveaux outils mathématiques dont son ami Marcel Grossmann lui avait indiqué qu'ils étaient exactement adaptés à la résolution de son problème de la gravitation. Et cet effort a radicalement changé sa perception des mathématiques. Lui qui reconnaissait plus jeune avoir négligé sa culture mathématique, et qui considérait en 1910 l'approche quadridimensionnelle de la relativité restreinte de Minkowski comme un luxe superflu, est devenu un chantre de l'approche mathématique, au point d'en perdre parfois son objectivité. Par conséquent, les chapitres 1 et 2 de cet ouvrage sont consacrés à une revue synthétique de la théorie de la relativité restreinte et à un exposé détaillé mais didactique du formalisme actuel de la relativité générale, préalables indispensables à une compréhension des articles historiques d'Einstein présentés dans les chapitres 3, 4 et 5, consacrés à la genèse de la théorie.

Un second constat s'impose également : il n'est pas possible de restituer et de comprendre pleinement la complexité de la genèse de la théorie et les affres vécues par Einstein, sans entrer dans les détails techniques de la recherche des équations de champ. Pour faire revivre cette genèse dans sa continuité, et de la manière la plus vivante, la plus pédagogique et la plus précise possible, j'ai décidé de m'appuyer sur une analyse directe des articles écrits par Einstein entre 1907 et 1918, agrémentée d'extraits et de citations d'Einstein lui-même. Je me suis aussi appuyé sur l'analyse détaillée réalisée par les historiens des sciences, dont notamment John Stachel, Tilmann Sauer, Jürgen Renn, et surtout John Norton et Michel Janssen.

Naissait alors l'idée de proposer un ouvrage pédagogique, permettant de comprendre à la fois le formalisme moderne et la genèse de la théorie de la relativité générale.

Les deux approches historique et technique viennent s'enrichir mutuellement. En effet, si la compréhension du formalisme moderne s'avère indispensable pour appréhender la genèse de la théorie, la connaissance de cette dernière permet de mieux assimiler et remettre en contexte certains concepts physiques parfois occultés par des présentations mathématiques très formelles. De plus, il est passionnant de voir comment Einstein a procédé pour créer, presque *ab nihilo*, une des théories les plus emblématiques de la physique. Parti d'une intuition physique forte, celle du principe d'équivalence, il a su ensuite adopter un formalisme mathématique et un cadre géométrique appropriés pour convertir cette idée initiale en une théorie de la gravitation

dont les prédictions sont d'une rare précision. Outre sa persévérance, l'adoption d'une double stratégie physique et mathématique a sans doute été la clef de sa réussite. Enfin, par l'utilisation de formalismes mathématiques modernes, la théorie de la relativité générale préfigure la physique moderne du XX^e siècle dont les groupes de symétrie, les invariances de jauge et l'approche variationnelle lagrangienne constituent les pierres angulaires.

Si, après un succès initial, la théorie de la relativité générale est retombée dans un oubli relatif dans les décennies qui ont suivi sa découverte, elle a connu un regain d'intérêt spectaculaire à partir des années 1960, constituant la base de modèles cosmologiques de plus en plus élaborés. Depuis septembre 2015, la détection des ondes gravitationnelles par les interféromètres LIGO aux États-Unis et Virgo en Europe a marqué de manière spectaculaire le centenaire de la théorie et ouvert de nouvelles perspectives observationnelles en astrophysique.

Sylvain Houard

Juillet 2026

Nota Bene

Un nouveau site – payant – permettant la consultation en ligne de toutes les archives d'Albert Einstein, en allemand et en anglais, sera mis en service le 30 septembre 2026. Pendant la rédaction de cet ouvrage, la consultation était encore gratuite.

Pour des informations sur la base de données et les tarifs, on pourra consulter le site : <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/einstein-database/>

Cependant, il est toujours possible d'acheter des volumes des *Collected Papers of Albert Einstein* (CPAE) – en allemand ou en anglais – en version papier sur le site de l'université de Princeton à l'adresse suivante : <https://press.princeton.edu/collected-works/collected-albert-einstein>