idem

ALBERT EINSTEIN

# La théorie de la relativité restreinte et générale

suivi de

## La relativité et le problème de l'espace

Traduit par
Maurice Solovine

Préface de
Marc Lachièze-Rey

DUNOD

La première édition française de cet ouvrage a été publiée par
Gauthier-Villars, rééditée en 1971 dans la collection
« discours de la Méthode »
sous la direction de Boris Rybak.


11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com


ISBN 978-2-10-083165-4

# Préface de Marc Lachièze-Rey

CECI N'EST PAS un livre de plus traitant de la relativité, mais l'ouvrage de son fondateur lui-même, Albert Einstein. Il explique la genèse et les fondements de sa théorie révolutionnaire à « ceux qui ne possèdent pas l'appareil mathématique de la physique théorique ». Bien des traités plus récents n'en sont que des redites, et cette préface ne saura d'ailleurs guère faire mieux que paraphraser celle d'Einstein, en répétant que l'ouvrage peut être lu par un simple bachelier, et qu'il ne requiert « qu'une bonne dose de patience et de force de volonté ».

**
*

Dans les deux premières parties, Einstein énonce et justifie avec une grande clarté ses principes de base : principe de relativité, constance absolue de la vitesse de la lumière… Il ne se fonde ni sur le calcul, ni sur des résultats d'expériences sophistiquées, mais sur la seule et pure réflexion logique, accessible à tous. Il utilise abondamment des situations imaginaires (souvent ferroviaires) pour montrer comment celles-ci conduisent nécessairement aux conclusions relativistes. Guidé pas à pas, le lecteur attentif est amené à conclure que la réalité ne saurait être autrement que telle que la décrit la théorie.

Ce n'est pas un hasard si Einstein commence son livre par des considérations géométriques. Par l'examen de la notion de « vérité géométrique », il initie le lecteur à l'existence d'une géométrie non conventionnelle, non *euclidienne* mais *riemanienne*. Et il introduit de manière tout aussi douce la notion de coordonnées. Une préparation à la suite, car la théorie qu'il présente est une théorie géométrique, ou plutôt – devrait-on déclarer – chrono-géométrique ; et les considérations qu'il introduit ici offriront un peu plus tard le cadre parfaitement adapté pour exprimer tout ce qui se prépare dans les chapitres suivants. Einstein se situe ainsi dans une tradition de géométrisation du monde dont Pythagore, Platon, Galilée… furent d'illustres représentants, et qui sous-tend toujours la physique contemporaine. Invitant le lecteur à réfléchir sur les notions d'espace et de temps, il peut aborder les notions cinématiques de base : principe de relativité, composition des vitesses.

En analysant la propagation de la lumière et des signaux, il amène graduellement à la prise de conscience de la disparition de la notion de simultanéité (absolue), puis de celle de distance. Il suit un raisonnement sans faille, auquel le lecteur ne peut qu'adhérer : « L'expérience nous a conduit à la conviction que, d'une part, le principe de relativité (restreinte) est vrai et que, d'autre part, la loi de la propagation de la lumière dans le vide doit être considérée comme égale à une constante *c*. En réunissant ces deux postulats nous avons obtenu la loi de transformation […] de Lorentz. » Le lecteur est conduit à l'obligation de l'adopter, en abandonnant la notion intuitive d'addition des vitesses, ainsi que la théorie de la relativité restreinte dont elle constitue le fondement : « une cristallisation de la théorie des phénomènes électromagnétiques de Maxwell-Lorentz ».

Ceci établi, Einstein prépare le lecteur à subir un « frisson mystique », en le suivant dans l'espace-temps à 4 dimensions ; là où la [chrono-]géométrie va donner toute sa puissance. Il nous révèle le cadre véritable de la théorie, sous forme « des conceptions importantes de Minkowski, sans lesquelles la théorie de la relativité générale, que nous allons exposer dans ses idées fondamentales, serait peut-être restée au maillot ».

Le lecteur est alors prêt pour aborder la relativité générale (deuxième partie). De manière très naturelle, Einstein lui propose de passer du « principe de relativité restreinte » au « principe de relativité générale ». Reconnaissant que la tentative de fonder une théorie sur ce dernier apparaît d'abord comme « désespérée », il conduira pourtant le lecteur – par une dialectique de raisonnements qui évoque les dialogues platoniciens – à reconnaître sa pertinence et sa validité. Sans même que soit encore abordée la géométrie non euclidienne (mais cela constituera un moyen pour l'introduire), il lui fait par exemple comprendre que le trajet d'un rayon lumineux doit parfois être courbe (chapitre 22). Dans la première édition de cet ouvrage (1916), Einstein annonce la possibilité d'une vérification très directe par l'observation. Celle-ci fut accomplie lors de l'éclipse de 1919. Elle est décrite dans l'appendice de cette 14e édition allemande (qui, plus généralement, détaille les confirmations expérimentales de cette théorie, qui ont eu lieu après la première édition de l'ouvrage).

Einstein chemine par expériences de pensée. Il propose des situations simples particulières qu'il analyse en faisant intervenir les principes qu'il a énoncés plus haut. Une didactique pédagogique que le lecteur ne peut que suivre, en concluant ainsi à l'inadéquation des fondements de la mécanique classique, et même de la relativité restreinte (chapitre 21) : il est insensiblement amené à accepter l'idée de courbure. Et Einstein le conduit à l'intuition d'un « continuum non euclidien » qui n'est autre que l'espace-temps courbe (chapitre 24). Un peu de géométrie suit alors : Einstein montre ensuite comment les implications du principe de relativité générale se traduisent par des énoncés géométriques. C'est la théorie de la relativité générale.

La troisième partie traite de cosmologie qui, à l'époque, n'existe pas encore en tant que science. Einstein montre d'abord l'impossibilité conceptuelle d'une cosmologie newtonienne bien fondée, et l'arbitraire des tentatives pour y remédier. Vient ensuite une présentation de son modèle, qui marque le véritable début de la cosmologie scientifique, dont l'heure de gloire sonnera plus tardivement, avec les modèles de big-bang : désormais, un modèle cosmologique, c'est une solution globale de la relativité générale, et la cosmologie nouvelle, dite alors *relativiste*, se fonde ainsi. L'innovation essentielle du modèle d'Einstein – et c'est l'idée qui l'a guidé pour le construire – c'est la résolution d'un problème lancinant, celui de la finitude de l'univers : pour la première fois, le modèle d'Einstein permet d'échapper au dilemme *fini et borné* ou *infini*. Il est en effet fini bien que non borné, une possibilité que seule autorise la géométrie non euclidienne, et donc la relativité générale qui se fonde sur elle.

L'ouvrage inclut un texte supplémentaire, de nature plus philosophique, sur la question de l'espace et la manière dont elle est traitée en relativité.

**
*

Bien qu'écrit au début de ce siècle, ce livre ne nécessite guère de réactualisations ; peut-être le remplacement des trains — évoqués pour illustrer les effets de vitesse — par des sondes spatiales, ainsi que l'abandon de la notion de référentiel qui semble un peu surannée ; ainsi bien sûr que la description des nombreux résultats d'expériences et d'observations qui, depuis, ont confirmé la théorie de la relativité générale.

Répétons-le, cet ouvrage n'offre pas seulement un intérêt historique, mais la possibilité d'une véritable initiation à la relativité. « Si le lecteur a suivi toutes nos considérations précédentes, il n'éprouvera plus aucune difficulté à comprendre les méthodes qui conduisent à la solution du problème de la gravitation. » Einstein est peut-être un peu optimiste : le lecteur novice devra cheminer très progressivement, phrase après phrase, et déchiffrer tout de même quelques équations ; mais peut-on exiger moins pour comprendre cette construction qui, après un siècle, continue à orienter toute la physique ? Nous sommes assurés d'accéder à l'esprit même de la théorie, celui de la vision einsteinienne, mais toujours moderne et actuel, ici exposé bien plus clairement et précisément que dans bien des manuels plus récents.

# Avant-propos

Ce petit livre a pour but de faire connaître, d'une manière aussi exacte que possible, la théorie de la relativité à ceux qui s'intéressent à elle au point de vue général, scientifique et philosophique, mais qui ne possèdent pas l'appareil mathématique de la physique théorique[1]. La lecture suppose à peu près des connaissances de bachelier et — malgré le peu d'étendue du livre — une bonne dose de patience et de force de volonté. L'auteur n'a pas ménagé sa peine pour présenter les idées fonda-

1. On trouvera les fondements mathématiques de la théorie de la relativité restreinte dans les mémoires originaux de H. A. Lorentz, A. Einstein et H. Minkowski, publiés sous le titre *Das Relativitätsprinzip* dans la collection de monographies *Fortschritte der mathematischen Wissenschaften* (Teubner), ainsi que dans le livre détaillé de M. Laue intitule *Das Relalivitätsprinzip* (Vieweg, Brunswick). La théorie de la relativité générale ainsi que les auxiliaires de la théorie des invariants s'y rapportant sont exposés dans le mémoire de l'auteur intitulé Die *Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie* (Barth, 1916) ; ce mémoire suppose une connaissance assez approfondie de la théorie de la relativité restreinte.

mentales d'une manière aussi claire et simple que possible et, en gros, dans l'ordre et la connexion dans lesquels elles ont réellement pris naissance. Dans l'intérêt de la clarté, il m'a paru inévitable de me répéter souvent, sans me soucier le moins du monde de donner à mon exposé une forme élégante ; j'ai consciencieusement suivi l'avis du théoricien génial L. Boltzmann, de laisser le souci d'élégance aux tailleurs et aux cordonniers. Je ne crois pas avoir caché au lecteur les difficultés inhérentes au sujet. J'ai, par contre, traité à dessein d'une façon sommaire les fondements empiriques et physiques de la théorie, afin que le lecteur qui n'est pas bien familiarisé avec la physique ne se trouve dans une situation semblable à celle du voyageur que les maisons empêchaient de voir la ville.

Puisse ce petit livre être un stimulant pour beaucoup de lecteurs et leur faire passer quelques heures agréables.

Décembre 1916.

A. Einstein.

A. Einstein.

---

Note ajoutée à la troisième édition. — Il a paru cette année (1918) un excellent *Traité détaillé de la Théorie de la relativité générale* par H. Weyl intitulé : *Raum, Zeit, Materie*, que nous recommandons chaleureusement aux mathématiciens et aux physiciens (Springer, Berlin).

# I

# La théorie de la relativité restreinte

# 1
# Le contenu physique des propositions géométriques

Sans doute avez-vous, cher lecteur, quand vous étiez jeune garçon, fait la connaissance du superbe édifice de la géométrie d'Euclide, et vous vous rappelez peut-être, avec plus de respect que de plaisir, cette imposante construction sur le haut escalier de laquelle des maîtres consciencieux vous forçaient de monter pendant des heures innombrables. En vertu de ce passé vous traiteriez avec dédain toute personne qui regarderait même la moindre proposition de cette science comme inexacte. Mais ce sentiment de fière certitude vous abandonnerait peut-être, si l'on vous posait cette question : « Qu'entendez-vous par l'affirmation que ces propositions sont vraies ? » À cette question nous voulons nous arrêter un peu.

La géométrie part de certaines notions fondamentales telles que le point, la droite, le plan, auxquelles nous sommes capables d'associer des représentations plus ou moins claires, et de certaines propositions simples (axiomes), que nous sommes disposés à regarder, en vertu de ces représentations, comme « vraies ». Toutes les autres propositions sont ensuite ramenées, au moyen d'une méthode logique dont nous nous sentons forcés de reconnaître la légitimité, aux axiomes, c'est-à-dire démontrées.

Une proposition est, par conséquent, exacte ou « vraie », si elle est déduite des axiomes de la manière généralement admise. La question de savoir si telle ou telle proposition géométrique est « vraie » se ramène, par conséquent, à la question de savoir si les axiomes sont « vrais ». Mais on sait depuis longtemps que non seulement on ne peut répondre à cette dernière question au moyen des méthodes de la géométrie, mais qu'elle n'a en elle-même aucun sens. On ne peut pas demander s'il est vrai que par deux points il ne passe qu'une seule droite. On peut seulement dire que la géométrie euclidienne traite de figures qu'elle appelle « droites » et auxquelles elle attribue la propriété d'être déterminées d'une manière univoque par deux de ses points. La notion de « vrai » ne s'applique pas aux énoncés de la géométrie pure, car par le terme « vrai » nous désignons, en dernier ressort, toujours la concordance avec un objet « réel ». Or, la géométrie ne s'occupe pas du rapport entre ses notions et les objets de l'expérience, mais seulement du rapport logique de ces notions entre elles.

Que nous nous sentions quand même portés à regarder les propositions de la géométrie comme « vraies », cela est facile à expliquer. Aux notions géométriques correspondent plus ou moins exactement des objets déterminés dans la nature, qui sont indubitablement la seule cause de leur naissance. Libre à la géométrie, pour donner à sa construction la plus grande cohésion logique possible, de ne pas en tenir compte. L'habitude, par exemple, de nous représenter une droite par deux points marqués sur un corps pratiquement rigide est profondément enracinée dans notre esprit. Nous sommes, en outre, habitués à supposer que trois points se trouvent sur une droite si, par un choix approprié du point de vision, nous pouvons faire coïncider leurs positions apparentes.

Si maintenant, en suivant nos habitudes de penser, nous ajoutons aux propositions de la géométrie euclidienne la seule proposition qui affirme qu'à deux points d'un corps pratiquement rigide correspond toujours la même distance (droite), quels que soient les changements de position que nous lui fassions subir, les propositions de la géométrie euclidienne deviennent des propositions sur la position relative possible de corps pratiquement rigides[1]. La géométrie ainsi complétée doit être traitée comme une branche de la physique. Et c'est avec raison que la question de la « vérité » des propositions géométriques ainsi interprétées peut maintenant être posée, car on peut se demander si ces propositions sont aussi valables pour les objets réels que nous avons coordonnés aux notions géométriques. D'une façon quelque peu imprécise nous pouvons, par conséquent, dire que nous entendons par la « vérité » d'une proposition géométrique en ce sens sa validité dans une construction avec le compas et la règle.

La conviction de la « vérité » des propositions géométriques en ce sens repose naturellement sur des expériences assez imparfaites. Nous voulons pour le moment admettre la vérité de ces propositions ; nous verrons ensuite, dans la dernière partie de nos réflexions (quand nous traiterons de la théorie de la relativité générale), qu'elle est limitée et dans quelle mesure elle l'est.

---

1. Par là on coordonne aussi à la ligne droite un objet naturel. Trois points A, B, C d'un corps rigide sont alors situés sur une droite si, A et C étant donnés, le point B est choisi de telle sorte que la somme des distances $\overline{AB}$ et $\overline{BC}$ est aussi petite que possible. Cette indication incomplète est ici suffisante.

# 2
# Le système de coordonnées

En vertu de l'interprétation physique de la distance, dont on vient de parler, nous sommes aussi en état de déterminer la distance de deux points sur un corps rigide au moyen de mesures. À cet effet nous avons besoin d'une droite (bâtonnet S), qui nous servira d'unité de mesure. Si maintenant A et B sont deux points d'un corps rigide, la droite qui les relie peut être construite d'après les lois de la géométrie ; on peut ensuite appliquer sur cette droite la droite S à partir de A autant de fois qu'il est nécessaire pour atteindre B. Le nombre des applications successives est la mesure de la droite AB. C'est sur ce procédé que repose toute mesure de longueur[1].

Toute description d'un lieu où se produit un événement, ou bien où se trouve un objet, consiste en ceci qu'on indique le point d'un corps rigide (corps de référence) avec lequel cet événement coïncide. Ce procédé n'est pas seulement employé dans la description scientifique, mais aussi dans la vie journalière. En analysant l'indication de lieu « à Paris, place du Panthéon », on trouve que sa signification est la suivante : le sol est le corps rigide auquel se rapporte l'indication du lieu. Sur ce sol, « la

---

1. Il est ici supposé que la mesure est faite sans laisser de reste, c'est-à-dire que le résultat est un nombre entier. On s'affranchit de cette difficulté en employant des règles graduées, dont l'introduction n'exige en principe aucune méthode nouvelle.