

MARC LAGHIÈZE-REY

# EINSTEIN



# À LA PLAGE

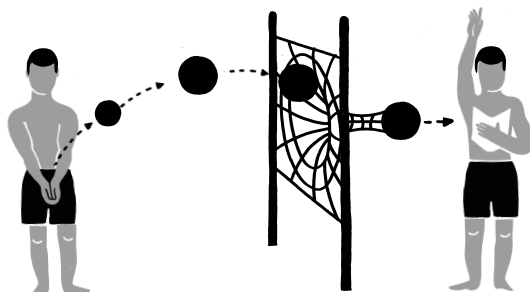
LA RELATIVITÉ  
DANS UN TRANSAT

Avec la collaboration  
de Ludovic Ligtot

Nouvelle édition

DUNOD

Conception de la couverture: Atelier AAAAA  
Illustrations de l'intérieur: Rachid Marai



© Dunod, 2015, 2017 pour cette nouvelle édition  
11 rue Paul Bert, 92 240 Malakoff  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)  
ISBN 978-2-10-076339-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

## PROLOGUE



# UN GÉNIE RÉVOLUTIONNAIRE

Albert Einstein : depuis près d'un siècle, ce nom est devenu synonyme de génie. Unanimement considéré comme l'un des plus grands scientifiques de tous les temps, il a fait progresser la physique dans de nombreux domaines. Il est surtout admiré pour avoir élaboré deux théories parmi les plus fondamentales du xx<sup>e</sup> siècle : la relativité restreinte en 1905 et la relativité générale en 1915. En bouleversant les conceptions établies du temps, de l'espace et de la matière, Einstein a provoqué une révolution d'une ampleur sans doute unique dans l'histoire des sciences et même des idées.

Né le 14 mars 1879 à Ulm en Allemagne, il n'apparaît pas spécialement remarquable dans ses premières années. Il rencontre même quelques difficultés dans l'apprentissage du langage. Sa scolarité lui pose ensuite certains problèmes, surtout à cause de son mépris de

l'autorité imposée. C'est une attitude qu'il conservera toute sa vie. Les enseignants le considèrent comme un élément perturbateur et étourdi... Cependant, il s'intéresse déjà beaucoup à la science et aux mathématiques et y obtient de très bons résultats. À 17 ans, il intègre l'École Polytechnique de Zurich à sa seconde tentative. La première avait échoué l'année précédente, à cause du test de culture générale. Son anticonformisme lui vaut encore des reproches et s'il obtient bien son diplôme en 1900, ce n'est pas très brillamment...

Pendant deux ans, il approfondit ses connaissances en autodidacte. Il tente en vain de décrocher un poste à l'université, puis y renonce finalement. Et il entre en 1902 à l'Institut fédéral de la propriété intellectuelle à Berne, comme « expert technique de troisième classe ». Son travail consiste à évaluer les mérites de diverses demandes de brevets. Cela lui laisse du temps libre pour continuer ses recherches, en vue d'obtenir son doctorat. Les circonstances sont devenues très favorables pour le jeune Einstein : il étudie les œuvres de grands physiciens et philosophes et il en discute avec des amis. Il est sans doute influencé par certains brevets qui lui passent sous les yeux.

1905 est son « année miraculeuse » : alors qu'il n'a pas encore obtenu son doctorat, il publie en quelques mois cinq articles d'une importance extrême. Deux d'entre eux fondent sa théorie de la *relativité restreinte*, où l'espace et le temps perdent le caractère « absolu » qu'ils avaient jusque-là. On y découvre la célèbre équation

$E = mc^2$ . Un autre est considéré comme le point de départ de la physique quantique...

Ce n'est pourtant qu'en 1908 qu'Einstein obtient un poste à l'université de Berne. Dès lors, sa notoriété ne cesse de croître dans la communauté scientifique. Il enseigne et donne de nombreuses conférences. Mais il travaille en même temps avec acharnement à l'élargissement du cadre de la relativité restreinte. Il la considère en effet incomplète car elle ne prend pas en compte la gravitation. À la fin de l'année 1915, il achève enfin sa nouvelle théorie, la *relativité générale*, qui décrit cette interaction d'une manière radicalement nouvelle, entièrement géométrique, en intégrant les acquis de sa relativité restreinte de 1905. Il est alors professeur à l'université de Berlin, considérée à l'époque comme la plus prestigieuse institution scientifique au monde. La publication de cette théorie en 1916, mais surtout sa première confirmation expérimentale le 29 mai 1919, lors d'une éclipse totale de Soleil, confèrent à Einstein une gloire mondiale. La presse et le public l'adorent à la fois pour son génie scientifique, son esprit rebelle, son photogénisme, ses boutades... En 1921, son voyage aux États-Unis suscite un accueil particulièrement enthousiaste.

« La chose la plus incompréhensible à propos du monde, c'est qu'il soit compréhensible. »

Albert Einstein, 1936

Les physiciens ont alors quelques difficultés à s'intéresser à la relativité générale : elle se présente comme

une théorie ardue, et surtout apparemment éloignée de toute application concrète. Pourtant, dès 1917, Einstein l'applique à l'étude de l'univers dans son ensemble, et fonde ainsi la *cosmologie relativiste*. Le flambeau de cette discipline est repris par le physicien belge Georges Lemaître, puis par bien d'autres. Mais elle mettra ensuite plusieurs décennies à se développer.

C'est en fait à partir des années 1960 que la relativité générale et la cosmologie relativiste trouvent toute leur pertinence, grâce à plusieurs résultats d'observations astronomiques. Einstein avait une belle avance avec sa « révolution relativiste en trois temps » : relativité restreinte, relativité générale, cosmologie relativiste !

Mais ce n'était pas tout car il a été également l'un des initiateurs de la physique quantique. Cette autre théorie physique recouvre un domaine différent : celui des interactions entre la matière et les rayonnements, essentiellement dans le domaine de l'infiniment petit ; très différente donc de la relativité générale et de la cosmologie... Elle fut initiée par l'un des articles d'Einstein, daté de 1905, qui débouchait sur l'hypothèse des *quanta* de lumière. Il lui a valu le prix Nobel de physique en 1921... alors qu'il n'en a reçu aucun en rapport avec la relativité !

Paradoxalement, Einstein s'est ensuite montré très critique sur les développements de la physique quantique. Par la suite, à partir des années 1920 et jusqu'à la fin de sa vie, il a consacré ses efforts à la recherche d'une

« théorie des champs unifiés », qui décrirait à la fois la gravitation et l'électromagnétisme. Ses tentatives ont échoué, mais depuis les années 1950 jusqu'à aujourd'hui, les physiciens continuent cette quête d'une approche unificatrice. Par exemple, ils tentent à présent d'unifier la gravitation et la physique quantique dans une sorte de « théorie du tout »...

La dernière partie de la vie d'Einstein débute en 1932 : peu de temps avant l'arrivée d'Hitler au pouvoir, il quitte l'Allemagne pour s'installer aux États-Unis. Il devient professeur à Princeton et met sa renommée au service du pacifisme et de l'antinazisme. En août 1939, il envoie au Président Franklin Roosevelt une lettre devenue célèbre. Il y explique que l'uranium dont disposait l'Allemagne nazie pourrait lui servir à la construction d'une bombe atomique. Cette lettre contribue à lancer le « projet Manhattan » pour développer l'arme nucléaire américaine. En 1945, Einstein réécrit à Roosevelt pour le prier de renoncer à cette arme. Et après la guerre, il milite pour un désarmement atomique mondial.

Il meurt à Princeton le 18 avril 1955 d'une rupture d'anévrisme, alors qu'il travaille encore sur un discours et sur sa théorie des champs unifiés. Science et humanisme l'ont accompagné jusqu'au bout...





## CHAPITRE 1



# LA RELATIVITÉ RESTREINTE SAUVE LA PHYSIQUE

*Les physiciens du XIX<sup>e</sup> siècle sont confrontés à un problème majeur : pourquoi lumière et matière se comportent-elles différemment ? La relativité restreinte d'Albert Einstein résout l'énigme en volatilissant le cadre classique du temps et de l'espace...*



### CONTINUITÉ ET RUPTURE

Au XVII<sup>e</sup> siècle en Italie, le génial Galilée (1564-1642) énonçait un principe s'appliquant au mouvement de la matière qui, plus tard, sera finalement appelé *principe de relativité*. En 1905, le jeune Einstein parvient à l'étendre à un nouveau domaine : celui de la propagation des ondes électromagnétiques, c'est-à-dire de la lumière visible mais également des rayonnements invisibles comme l'infrarouge, l'ultraviolet ou les ondes radio. Surtout, Einstein

confère un rôle central à ce principe de relativité, en continuité avec celui de Galilée.

Mais en même temps, il se montre en rupture avec le savant de la Renaissance, dans le domaine de la *cinématique*. Cette discipline décrit le mouvement des objets « libres » (ceux qui ne sont soumis à aucune interaction) par opposition à la dynamique qui décrit leurs mouvements lorsqu'ils sont soumis à des forces. Einstein remplace la cinématique de Galilée par une nouvelle cinématique. Cela va impliquer une théorie nouvelle, mais surtout un abandon radical : celui des notions d'espace et de temps au profit de celle d'*espace-temps*, une entité globale aux propriétés étonnantes...

## UN NOUVEAU PRINCIPE DE RELATIVITÉ

Quel est donc ce fameux principe de relativité, énoncé par Galilée puis étendu par Einstein ? Chez l'un comme chez l'autre, il déclare la chose suivante : « les lois de la physique s'écrivent exactement de la même façon pour différents "observateurs" (des physiciens effectuant des mesures) en mouvement les uns par rapport aux autres ».

Avec l'importante condition, cependant, que ces observateurs soient *inertiels*, c'est-à-dire qu'ils ne soient soumis à aucune force et n'évoluent que selon leur propre inertie. Cela exclut par exemple un cosmonaute poussé par les moteurs de sa fusée, ou une planète soumise à l'attraction gravitationnelle du Soleil... Tous les observateurs inertiels ont les uns par rapport aux autres des *mouvements uniformes*, c'est-à-dire en ligne droite et à vitesse constante

(ce qui constitue d'ailleurs l'énoncé d'un autre principe, le *principe d'inertie*).

Un observateur au repos (qui ne se déplace pas) est également un observateur inertiel. Le principe de relativité implique donc directement que les lois physiques s'écrivent pour *tout* observateur inertiel comme s'il se trouvait au repos ! Voilà la « substantifique moelle » du principe, que Galilée avait résumé par la belle formule « *le mouvement [uniforme] est comme rien* »...

Ceci justifie l'usage du terme *relativité*. Le principe implique que tous les observateurs inertiels jouent des rôles strictement identiques, que les lois s'énoncent identiquement pour tous. Dans ces conditions, impossible d'en distinguer certains, que l'on déclarerait par exemple au repos tandis que les autres seraient en mouvement. Autrement dit, la seule notion de mouvement ayant un sens est celle de mouvement *relatif* entre différents observateurs. Aucun moyen de donner un sens à celle de « mouvement absolu », ni d'ailleurs de « repos absolu », qui pourrait servir de référence.

Le principe de relativité galiléen a servi de base à la physique de Newton. Il exprime la façon dont les deux savants considéraient l'espace et le temps dans leurs théories.

Einstein parvient à étendre ce principe aux lois et aux phénomènes de *l'électromagnétisme*. Cette théorie, élaborée dans les années 1860 par le physicien écossais James Clerk Maxwell, unifie l'électricité et le magnétisme. Le principe de relativité einsteinien, ainsi étendu, va constituer le socle de sa nouvelle théorie, la *relativité*

*restreinte*. Comme son pendant galiléen, il concerne les observateurs inertiels, en mouvements uniformes. Mais cette fois il prend en compte les lois de l'électromagnétisme. Or ceci n'est pas anodin car, comme l'a compris Einstein, cela implique la disparition des notions de temps et d'espace absolus, qui seront remplacées par celle d'*espace-temps* ! Une dizaine d'années plus tard, Einstein étendra encore la validité de ce principe aux observateurs non inertiels et aux mouvements non uniformes. Cela constituera la base de la théorie de la relativité générale (détaillée au chapitre suivant), qui manipule la géométrie d'un espace-temps « déformé ». Tout un programme...

### **1905, « année miraculeuse »**

En 1905, Albert Einstein est employé au Bureau Fédéral de la propriété intellectuelle de la ville de Berne. Son travail : évaluer la valeur des brevets déposés. « Sans ce travail, écrira-t-il, [...] j'aurais fini par perdre la raison ». Il jouit en tout cas d'une sécurité matérielle qui le laisse libre de réfléchir, et lui permet de publier cinq articles fondamentaux qui vont révolutionner la physique : une véritable *annus mirabilis* pour lui !

Le premier, *Une vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière*, propose l'hypothèse du « quantum de lumière ». Il constituera le fondement de la physique quantique, et vaudra à Einstein le prix Nobel en 1921 (le seul de sa carrière, étrangement) !

Les deux articles suivants, *Sur une nouvelle détermination des dimensions moléculaires* et *Sur le mouvement des*

*petites particules en suspension dans un liquide stationnaire, en fonction de la théorie cinétique moléculaire de la chaleur,* sont liés à sa thèse de doctorat. Il y explique le « mouvement brownien » (complètement irrégulier) des particules en suspension dans un liquide, par leurs chocs avec les molécules de ce liquide. Cela valide pour de bon l'hypothèse de l'existence des atomes et molécules...

Le quatrième, *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement*, fonde la relativité restreinte, accompagné du cinquième, *L'inertie d'un corps dépend-elle de l'énergie qu'il contient ?* Ce dernier dévoile la plus célèbre équation de la physique :  $E = mc^2$ .

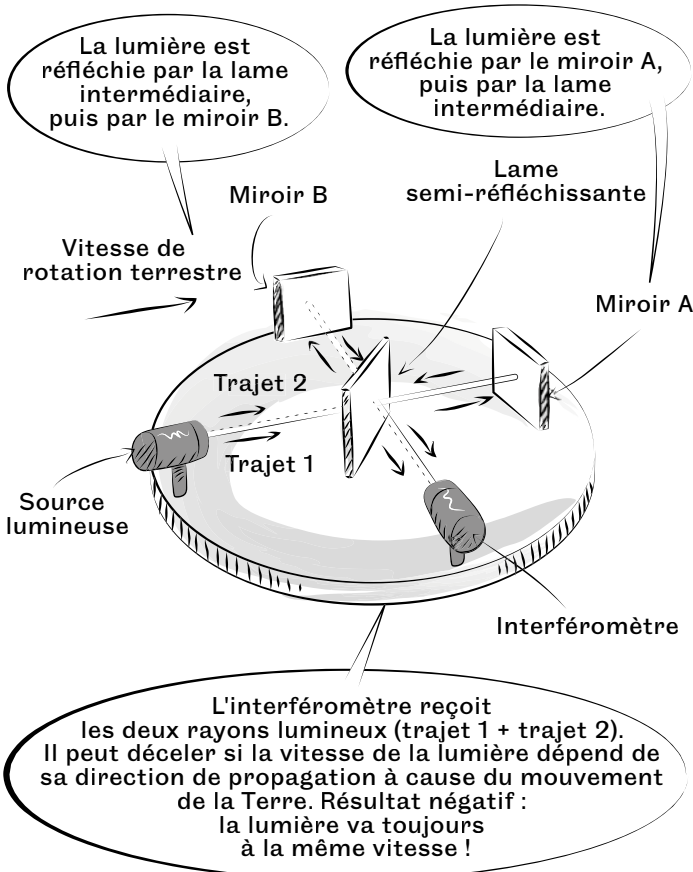
## UN FÂCHEUX PROBLÈME DE VITESSES

Mais comment Einstein en est-il arrivé à renier la notion de temps ?

À cause d'un étonnant problème rencontré par la cinématique galiléenne. Celle-ci décrit, nous l'avons dit, les mouvements des objets *libres*, ceux qui ne sont soumis à aucune interaction. Un tel mouvement ne peut donc dépendre de rien d'autre que des propriétés... de l'espace et du temps eux-mêmes ! Ceci fait apparaître la cinématique comme l'expression des propriétés de l'espace et du temps et des relations qu'ils entretiennent...

La cinématique galiléenne (ou newtonienne) possède une propriété remarquable et familière : les vitesses des objets s'y composent en s'additionnant simplement. Si vous marchez à la vitesse  $V_1$  dans un train qui roule à la

vitesse  $V_2$ , vous vous déplacez à la vitesse  $V_1 + V_2$  par rapport aux rails. Une évidence totale *a priori* qui fut pourtant au cœur d'une crise décisive...



**L'expérience de Michelson et Morley**