

→ Aperçu

edp sciences

LA RELATIVITÉ EN IMAGES



BRUCE BASSETT & RALPH EDNEY

→ Aperçu

LA RELATIVITÉ

BRUCE BASSETT & RALPH EDNEY

edp sciences

Dans la même collection :

Le temps en images, 2014, ISBN : 978-2-7598-1228-8

La théorie quantique en images, 2014, ISBN : 978-2-7598-1229-5

La physique des particules en images, 2014, ISBN : 978-2-7598-1230-1

La psychologie en images, 2014, ISBN : 978-2-7598-1231-8

Édition originale : *Relativity*, © Icon Books Lts, London, 2009.

Traduction : Alan Rodney

Imprimé en France par Présence Graphique, 37260 Monts

Mise en page de l'édition française : studiowakeup.com

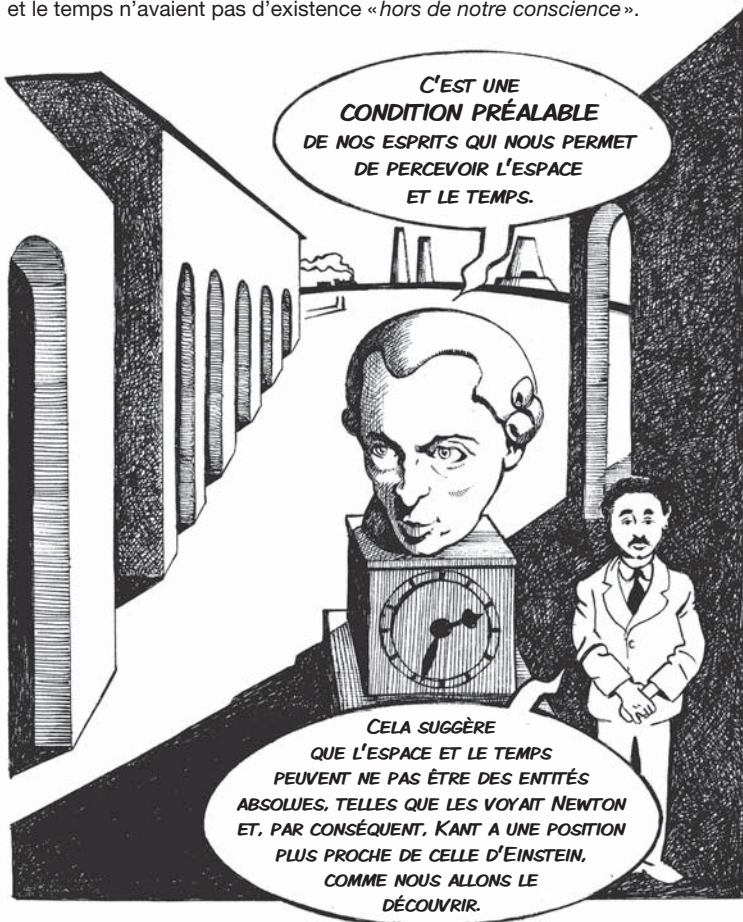
ISBN : 978-2-7598-1728-3

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2015

Les conditions d'existence de l'espace et du temps

Le philosophe allemand **Emmanuel Kant** (1724–1804) a plongé jusqu'aux limites de nos connaissances en publiant son texte révolutionnaire *Critique de la raison pure* (1781). Il y défendait son point de vue selon lequel l'espace et le temps n'avaient pas d'existence « hors de notre conscience ».



Néanmoins, jusqu'à Einstein, la philosophie dominante des physiciens était celle héritée de **Sir Isaac Newton** (1643–1727).

Les lois classiques de la physique selon Newton

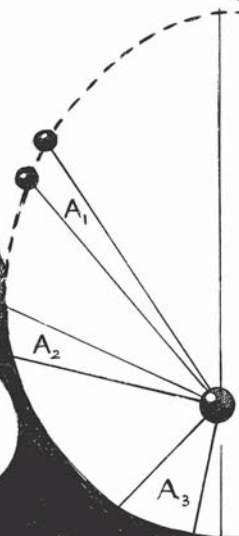
Isaac Newton était, sans conteste, le plus grand scientifique parmi les physiciens et les mathématiciens de son époque. Il a contribué de façon significative aux sciences optiques; de plus, il a formulé ses trois lois du mouvement et développé le calcul différentiel et intégral indépendamment de **Gottfried Wilhelm Leibniz** (1646–1716). Mais, en termes de compréhension de la relativité – que nous devons à Einstein –, c'est bien la **loi de la gravitation universelle** de Newton qui sera la plus déterminante pour notre propos.

Johannes Kepler (1571–1630)



J'AVAIS DÉJÀ DÉCOUVERT DES LOIS POUR EXPLIQUER LE MOUVEMENT DES PLANÈTES...

AVANT NEWTON, LE DÉPLACEMENT DES PLANÈTES DANS LES CIEUX ÉTAIT CONSIDÉRÉ COMME UNE QUESTION BIEN MYSTÉRIEUSE, DISSOCIÉE DES AFFAIRES DU QUOTIDIEN.



CERTES, MAIS VOUS AVEZ DÉCOUVERT DES LOIS EMPIRIQUES SANS EXPLICATION THÉORIQUE.

$$\frac{D^3}{T^2} = K$$

Une histoire célèbre, bien qu'apocryphe, décrit un Newton assis sous un pommier et au moment où il a fait sa grande découverte de la gravité, une pomme lui est tombée littéralement sur la tête.



L'importance particulière de la loi de la gravitation universelle de Newton est qu'elle explique et unifie plusieurs phénomènes en **une seule théorie**. Cette recherche pour **la théorie unificatrice** allait devenir une force qui sous-tendrait la physique des XX^e et XXI^e siècles.

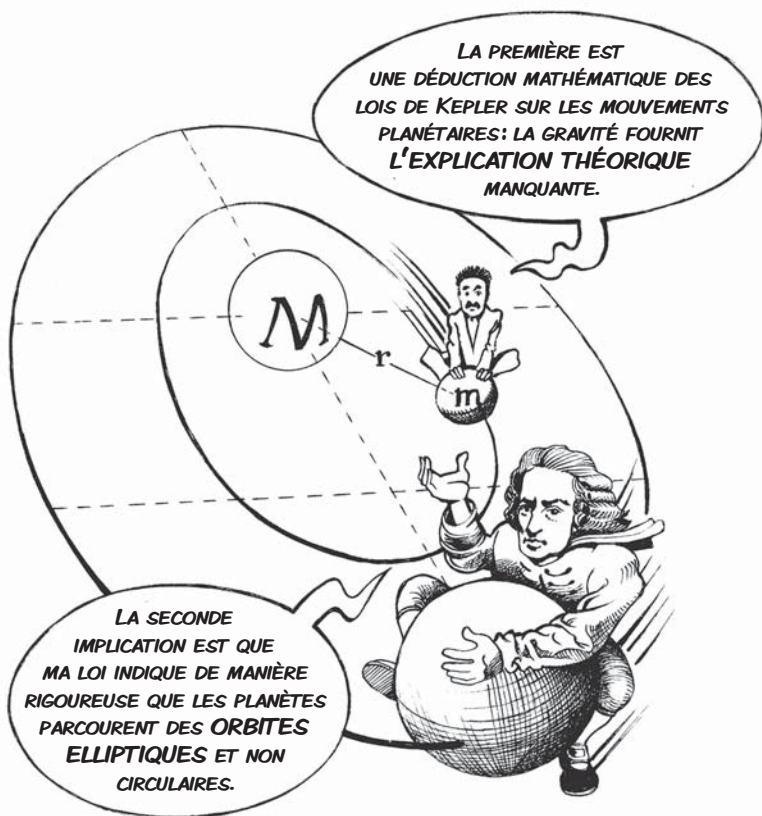
La loi de la gravité universelle

La loi de la gravitation universelle de Newton énonce que la force de gravité (F) entre deux objets de masse m et M s'écrit :

$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

où r est la distance entre les centres de deux objets et G la constante dite de Newton. G est très petite puisque la force de la gravité est très faible.

Deux implications au moins découlent de cette loi de la gravité.



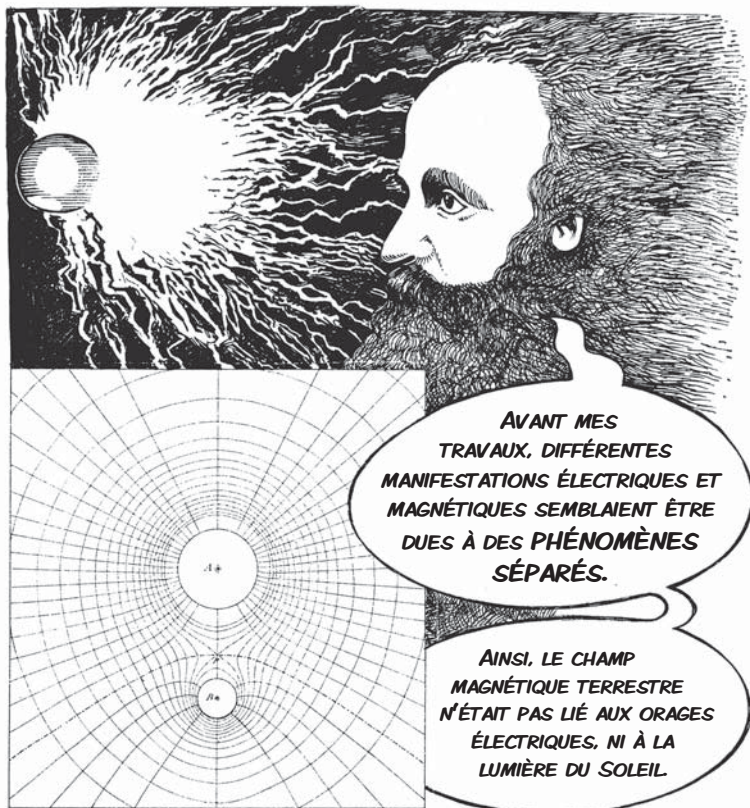
Newton avait fait plusieurs présuppositions en formulant sa théorie. La Terre n'étant plus le centre de l'Univers – et ce aux yeux de nombreux scientifiques depuis **Nicolas Copernic** (1473–1543) –, il était acquis que l'espace et le temps étaient deux choses fondamentalement **distinctes** et que les deux étaient **absolues**, pour ainsi dire gravées dans le marbre.



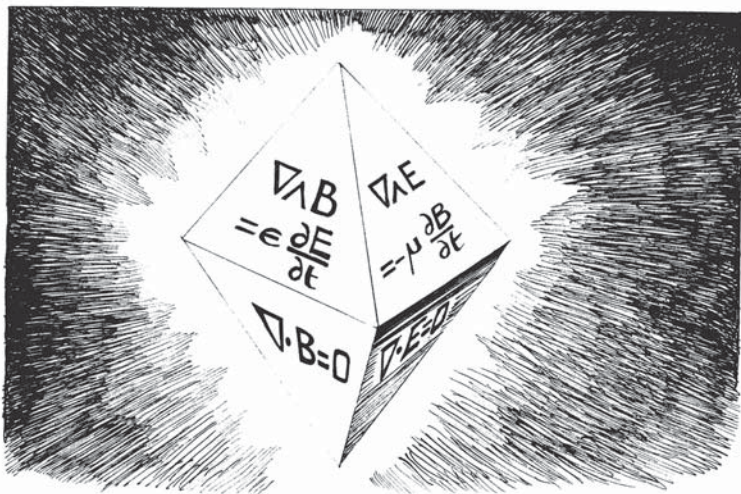
L'idée d'unifier les deux concepts, de l'espace et du temps, est revenue à Einstein, comme nous allons le voir dans la suite.

La théorie de Maxwell sur l'électromagnétisme

La physique théorique avait enregistré des progrès significatifs avant Einstein. En particulier, **James Clerk Maxwell** (1831–1879) avait déjà unifié le magnétisme et l'électricité en un seul phénomène, l'**électromagnétisme**.



C'est au moyen de quatre équations que Maxwell a réussi à expliquer toutes les manifestations électriques et magnétiques – depuis l'émission de la lumière, les courants électriques jusqu'au champ magnétique terrestre. Les équations de Maxwell, reliant les champs électriques et magnétiques, ont démontré comment chaque manifestation était un cas particulier d'une **théorie générale**.

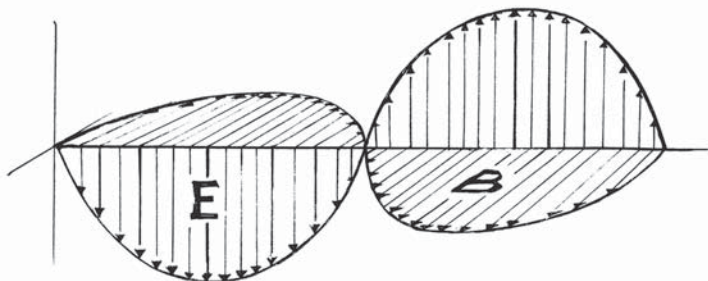


Il peut y avoir des champs magnétiques sans champ électrique (et inversement).

Mais en général, si l'intensité d'un champ électrique varie dans le temps, il va générer un champ magnétique... et inversement.

C'est le cas de la lumière, constituée de champs électrique et magnétique en oscillation qui se propagent au travers de l'espace et dans le temps – à la vitesse de la lumière.

L'unification à laquelle a abouti Maxwell est semblable, du point de vue conceptuel, à celle de Newton quand ce dernier s'est rendu compte que la force que subissait la pomme était identique à celle qui maintenait la Terre en orbite autour du Soleil.



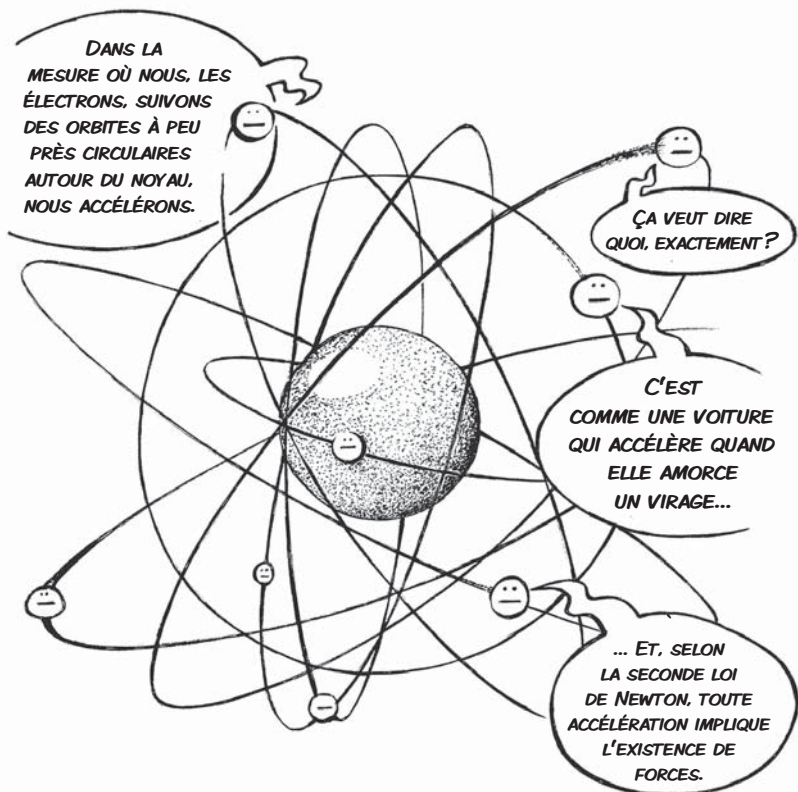
Des problèmes de la physique classique

Nombre de problèmes ont été identifiés dans cette histoire de progression de la physique. L'un d'eux concerne la gravité. La théorie de la gravité formulée par Newton avait prédit avec exactitude que les planètes se déplaçaient sur des orbites elliptiques.



L'énigme de l'atome

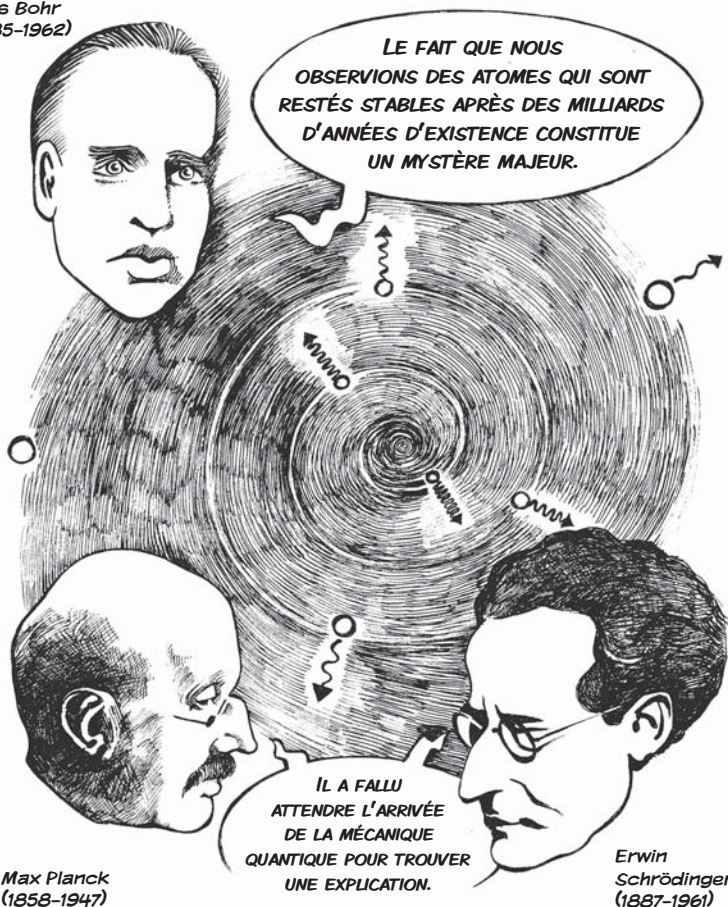
La composition de l'atome représentait aussi une sérieuse épine pour les physiciens. Au tout début du XX^e siècle, on voyait l'atome comme un noyau chargé positivement, entouré d'électrons chargés négativement, bien moins massifs que les particules du noyau. Les électrons sont obligés de parcourir des orbites autour du noyau, faute de quoi ils décrocheraient pour tomber vers le noyau, en raison de la force d'attraction entre la charge négative de chaque électron et les charges positives du noyau.



Un grand mystère

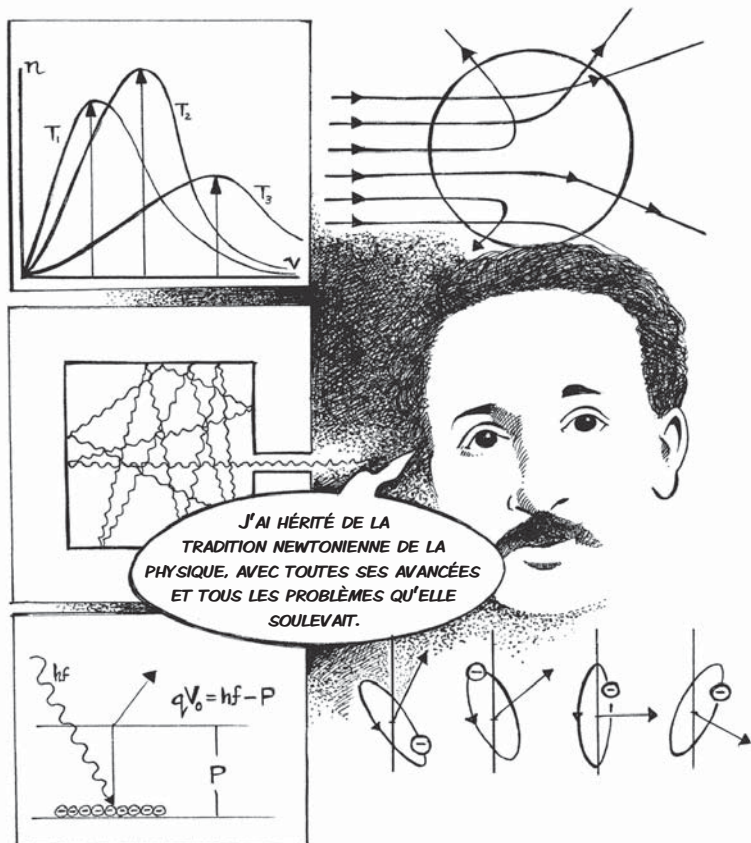
À partir de la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell, on savait pertinemment qu'une charge qui accélère émet de la lumière (ou un rayonnement électromagnétique mais à une fréquence différente) avec un niveau d'énergie dépendant de la valeur de l'accélération. Et si les électrons perdent de l'énergie en raison de cette émission de lumière, ils devraient amorcer une descente en spirale vers le noyau, l'atteignant en moins d'un millième de milliardième de seconde !

Niels Bohr
(1885-1962)



Le contexte historique « moderne »

Nous avons à présent une idée approximative de l'état de la physique en 1905, quand **Albert Einstein** (1879–1955) a publié sa *théorie de la relativité restreinte*. Einstein n'était pas né de la dernière pluie.



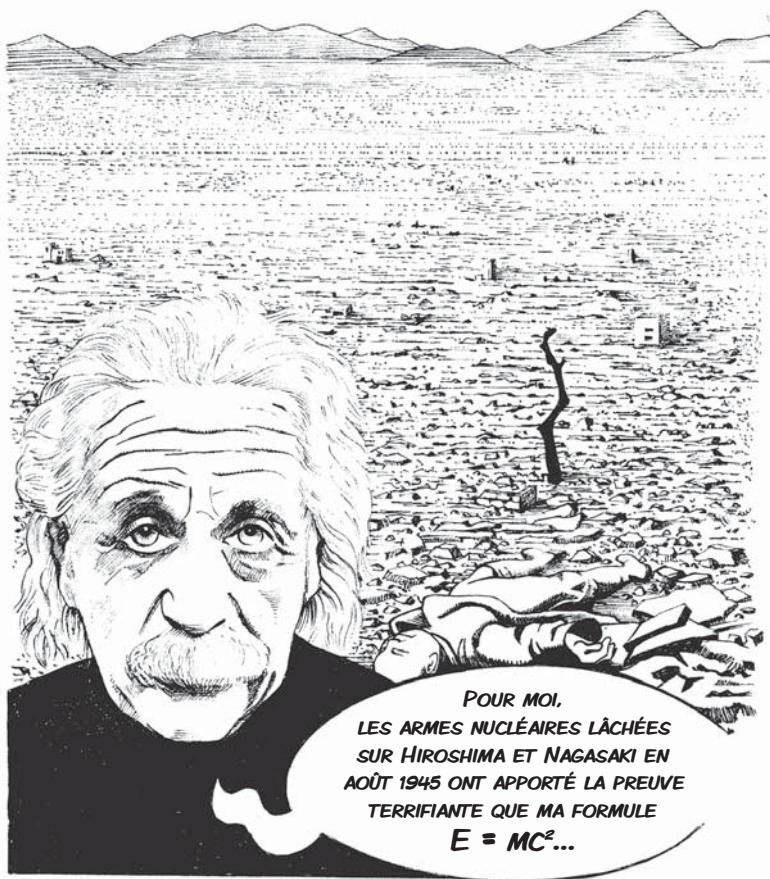
L'essor d'Einstein est arrivé à une certaine conjoncture des événements du monde, où régnait un certain « climat de l'esprit », lequel a ajouté un contexte à ses découvertes.

Des événements décisifs

La mort de la reine Victoria en 1901 a marqué la fin d'une période d'histoire relativement stable, mais aussi le début du XX^e siècle, sa libération d'énergies violentes et une accélération d'innovations – de tout ce que nous qualifierions aujourd'hui de « moderne ». Un nouveau monde dangereux est né de deux événements majeurs – en premier lieu, la Grande Guerre de 1914–1918...

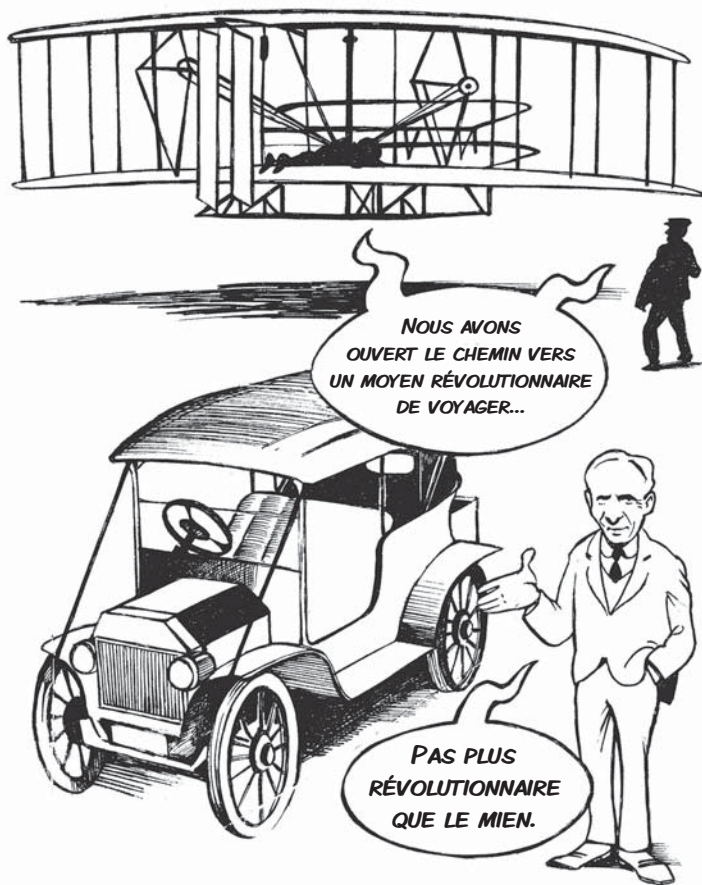


Le second événement majeur fut la révolution d'octobre de 1917 en Russie, qui a vu l'avènement de l'Union soviétique communiste. Le communisme et l'opposition que cette politique a suscitée aux États-Unis et en Europe ont préparé le décor pour le déroulement de la guerre froide qui a dominé le monde pendant la seconde moitié du XX^e siècle.



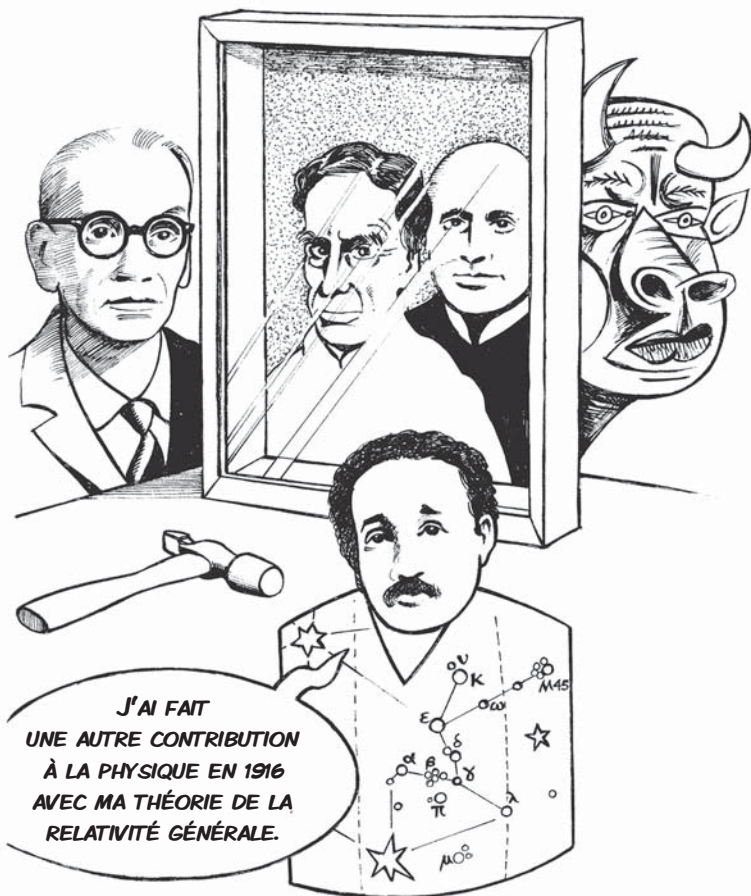
Une époque propice au mouvement

L'énergie déployée et l'inquiétude du début du XX^e siècle pouvaient être perçues au travers d'autres « unes ». **Les frères Wright, Orville** (1871–1948) et son aîné **Wilbur** (1867–1912), ont réussi leur premier vol motorisé en 1903.



Henry Ford (1863–1947) a produit en 1912 sa *Model T* assemblée sur des chaînes de montage en grande série, pour des millions d'acheteurs.

Pablo Picasso (1881–1973) a introduit l'art révolutionnaire du cubisme en 1906, suivi et développé par **Georges Braque** (1882–1963). Les philosophes britanniques **Bertrand Russell** (1872-1970) et **Alfred North Whitehead** (1861–1947) ont publié leur extraordinaire *Principia Mathematica* en 1910–1913, une œuvre magistrale qui a tenté de reformuler les mathématiques de leur temps, sur des bases rigoureuses de la logique.



Nous allons brièvement nous intéresser à la relativité restreinte pour nous concentrer ensuite sur les complexités de la relativité générale.

Les transformations de Lorentz

Einstein était un grand penseur, un bricoleur de génie connu pour s'être servi de découvertes souvent délaissées par d'autres. Ainsi, les travaux de **Hendrik A. Lorentz** (1853–1928) entrent dans cette catégorie, de manière cruciale.





Ce qui conduit à la Formule

$$t_{\text{EINSTEIN}} = \frac{t_{\text{LORENTZ}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Lectures complémentaires recommandées par l'auteur

Les lecteurs intéressés pourront utilement consulter les références bibliographiques suivantes (en anglais) :

Ouvrages d'introduction

Les titres suivants, ouvrages d'initiation aux sujets traités, devraient pouvoir être lus par un large public.

Einstein

Introducing Einstein, Joseph Schwartz et Michael McGuiness (Icon Books, 1999)

Relativité générale

The Meaning of Relativity, Albert Einstein (Princeton University Press, 1992)

Flat and Curved Spacetimes, George Ellis et Ruth Williams (Oxford University Press, 2000)

Cosmologie

Il existe un grand choix de livres « grand public » qui traitent de la cosmologie.

L'auteur recommande, entre autres :

Cosmology: A Very Short Introduction, Peter Coles (Oxford Paperbacks, 2001)

Just Six Numbers, Martin Rees (Orion Fiction, 2001)

The Big Bang, Joseph Silk (W.H. Freeman & Company, 2001)

Inflation

The Inflationary Universe, Alan Guth (Vintage, 1998)

Mécanique quantique

Introducing Quantum Physics, J.P. McEvoy et Oscar Zarate

Traduit en français (EDP Sciences, 2014) : *La théorie quantique en images*

In search of Schrödinger's Cat, John Gribbin (Corgi, 1985)

La gravité quantique

Dreams of a Final Theory, Steven Weinberg (Vintage, 1993)

A Brief History of Time, Stephen Hawking (Bantam, 1995)

Introducing Hawking, J.P. McEvoy et Oscar Zarate (Icon Books, 1999)

Niveau avancé

Il s'agit d'ouvrages qui demandent une certaine compréhension des mathématiques ou de la physique :

Subtle is the Lord, Abraham Pais (Oxford Paperbacks, 1984), célèbre récit de la vie d'Einstein, qui offre des approfondissements intéressants sur les questions théoriques de la relativité.

Introducing Einstein's Relativity, Ray d'Inverno (Clarendon Press, 1992)

Une bonne introduction aux mathématiques et à la physique qui sous-tendent la relativité générale. Texte de référence, pour étudiants avancés / post-doctorants.

Les textes de référence sur la relativité générale (et on notera que les trois premiers ont été publiés la même année, en 1973):

The Large-Scale Structure of Spacetime, Stephen Hawking et George Ellis (CUP, 1973)

Gravitation, Charles W. Misner, Kip S. Thorne et Johan Archibald Wheeler (W.H. Freeman, 1973)

Gravitation and Cosmology, Steven Weinberg (John Wiley & Sons, 1972)

General Relativity, Robert Wald (Chicago University Press, 1984)

L'auteur et l'artiste

Bruce Basset était maître de conférences à l'Institute of Cosmology and Gravitation à l'université de Portsmouth, au Royaume-Uni, où il a étudié (sans grand succès, dit-il) les mystères des débuts de l'Univers. Avant d'occuper ce poste, Bruce Basset effectuait des recherches dans le département de physique de l'université d'Oxford, ainsi qu'à l'International School for Advanced Studies à Trieste. Avant cela, il possédait une société de développement de sites web, basée au Cap, en Afrique du Sud, où il avait étudié les beaux-arts. Bruce a publié 30 articles de recherche ; il supervise les travaux de plusieurs doctorants et docteurs qui sont à la fois amicaux et beaucoup de collaborateurs très futés, ce qui permet à Bruce de voyager souvent de par le monde.

Il a profité d'une merveilleuse année sabbatique à l'université de Kyoto avant de revenir au Cap, pour occuper un poste partagé entre l'Observatoire astronomique d'Afrique du Sud (SAAO) et le département de mathématiques à l'université du Cap (UCT) où il est professeur titulaire. Depuis mi-2010, il travaille également au centre de recherches AIMS en tant que maître de conférences, où il essaie d'introduire et de promouvoir la recherche en cosmologie.

Ralph Edney, formé initialement en mathématiques, a enseigné cette matière, mais est aussi journaliste et dessinateur de caricatures politiques. Il est l'auteur de deux romans graphiques et a illustré les ouvrages d'*Introducing Philosophy* and *Introducing Fractal Geometry* chez Icon Books. C'est aussi un fan inconditionnel de cricket.

Remerciements

Bruce Basset remercie tout particulièrement le personnel d'Icon Books et Peter Coles pour l'avoir impliqué dans ce projet. Ses remerciements vont aussi à Mike Basset, Josh Bryer, George Ellis, David Kaiser, Philippos Papadopoulos, David Parkinson, Fabrizio Tamburini, Ran van der Merwe et Fermin Viniegra pour leurs suggestions créatives et leurs commentaires « lumineux » sur le manuscrit. De même, Bruce Basset remercie George Ellis pour lui avoir enseigné tant de choses sur la relativité, qu'il possède à merveille.