

Spécial  
100 ans

# EINSTEIN & LA RELATIVITÉ

1915

L'INVENTION D'UNE THÉORIE  
RÉVOLUTIONNAIRE

2015

LES NOUVEAUX DÉFIS  
DE LA PHYSIQUE



M 02579 - 273H - F: 4,95 € - RD

Tout comprendre en 16 pages d'infographies

# RTL

#RTLbouge

PHOTO : ROMAIN BOÉ / ABACAPRESS



LUNDI-JEUDI 20H-22H

## LA CURIOSITÉ EST UN VILAIN DÉFAUT

SIDONIE BONNEC & THOMAS HUGUES

LUNDI 7 DÉCEMBRE

## ALBERT EINSTEIN

Avec Cécile Bonneau  
Rédactrice en Chef *Science & Vie Hors-Série*

Une publication du groupe

**MONDADORI FRANCE**

Président: Ernesto Mauri

**RÉDACTION**

8, rue François-Ory  
92543 Montrouge CEDEX  
Tél.: 01 46 48 48 67  
Directeur de la rédaction: Matthieu Villiers,  
Assisté de Christelle Borelli  
Rédacteur en chef: Cécile Bonneau  
Directrice artistique: Yvonne Diraison  
Rédacteur chef adjoint [édition]: Grégoire Bouillier  
Première secrétaire de rédaction: Anouk Delport  
Secrétaire de rédaction: Juliette Camuzard  
Premier maquettiste: Jean-Michel Sabaté  
Responsable du service photo: Clémence Gérard  
Chef du service infographie: Boris Bellanger  
Chef du service documentation: Marie-Anne Guffroy  
Documentaliste: Frédéric Vladislav  
Service lecteurs: sev.lecteurs@mondadori.fr

ONT COLLABORÉ À CE NUMÉRO:

Pierre-Yves Bocquet, Didier Florentz, Mathieu Grousson,  
Laurent Hindryckx, Román Konicoff, Miko Kontente,  
Olivier Laprot, Emmanuel Monnier, Alexandra Piñen,  
Philippe Testard-Vaillant

**DIRECTION-ÉDITION**

Direction pôle: Carole Fagot  
Directeur délégué: Vincent Cousin

**DIFFUSION**

Site: www.vendezplus.com.  
Directeur diffusion: Jean-Charles Guérault  
Responsable diffusion marché: Shiam Daassa

**MARKETING**

Responsable marketing: Sandra Boixel  
Chef de produit: Mathilde Janier-Bonnichon  
Abonnements: Nathalie Carrère

**PUBLICITÉ**

Directrice exécutive: Valérie Camy  
Directrice de groupe commercial: Caroline Soret  
Directrice de publication adjointe: Virginie Commun  
Directeur de clientèle: Lionel Dufour  
Planning: Stéphanie Guillard, Angélique Consoli,  
Sabrina Rossi-Djenidi  
Assistante de publicité: Christine Chesse  
Responsable technique: Stéphane Durand  
Op's: Jean-Jacques Bénézech, Grégory Gounse,  
Anne-Sophie Chauvière  
Tél.: 01 46 33 51 16; fax: 01 33 50 34

**FABRICATION**

Gérard-Laurent Greck, Marie-Hélène Michon  
(Chefs de fabrication)

**DIRECTEUR ADMINISTRATIF ET FINANCIER**  
Hervé Godard

**FINANCE MANAGER**  
Guillaume Zaneski

**ÉDITEUR**

Mondadori Magazines France  
Siège social: 8, rue François-Ory  
92543 Montrouge Cedex

Directeur de la publication: Carmine Perna

Actionnaire: Mondadori France SAS

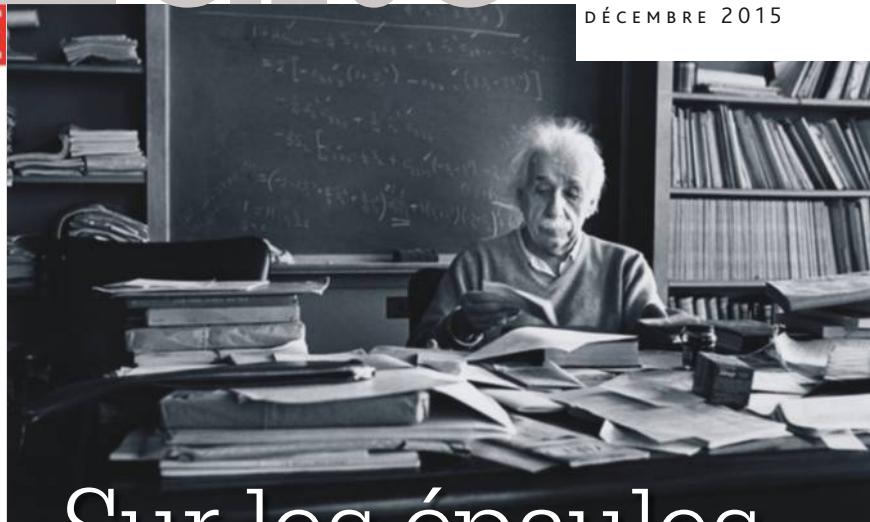
Imprimeur: Elcograp - Italie

N° ISSN: 0151-0284

N° de commission paritaire: 1015 K 79977  
Dépôt légal décembre 2015

**RELATIONS CLIENTÈLE ABONNÉS**

Par mail: relations.clients@mondadori.fr;  
par téléphone: 01 46 48 48 96 (de 8 h à 20 h du lundi au samedi); par courrier: Science & Vie Abonnements, B341, 60643 Chantilly Cedex. Par Internet: www.kiosquemag.com Etats-Unis et Canada: Express Mag, 8155, rue Larrey, Anjou (Québec), H1J 2L5. Tél.: 1 800 363-1310 (français) et 1 877 363-1310 (anglais); fax: (514) 355-3332. Suisse: Edigruppe Suisse, 022 860 84 50 mondadori-suisse@edigruppe.ch Belgique: Edigruppe Belgique, 070 233 304 mondadori-belgique@edigruppe.be Autres pays: nous consulter. Commande d'anciens numéros et de reliures: tél. 01 46 48 48 97 - relations.clients@mondadori.fr



## Sur les épaules d'Einstein

Depuis cent ans, on admire la relativité générale, étonnés devant tant de perfection. On l'observe sous toutes les coutures, on la décorative, on reconstitue sa fabrication dans les moindres détails. On en découvre des richesses cachées, des ressources insoupçonnées. On trouve peu à peu les mots, les images, les métaphores, pour la rendre compréhensible par tous. On a aussi tenté de la déboulonner, comme irrités devant tant de grâce. Mais rien n'y fait. Elle reste aussi digne et muette qu'une statue.

Malgré tous leurs efforts, les physiciens ne sont pas encore parvenus à dominer Einstein, à poursuivre dans la voie qu'il avait lui-même indiquée. Il reste un géant indépassable et écrasant. Comme si ces cent années n'avaient pas suffi pour se mettre à son niveau. Pour se hisser sur ses épaules. Car, comme le disait Newton, il n'y a qu'une fois juché sur les épaules des géants que l'on peut voir plus loin. On n'y est pas encore. Mais cela ne saurait plus tarder... **S & V-HS**

# Science & Vie

273

DÉCEMBRE 2015

## 6 Les 11 piliers du mythe Einstein

Ou pourquoi le physicien est devenu l'incarnation du génie humain.

## 1915 : L'INVENTION

### 26 Où en était la science en 1915 ?

Des débuts de l'aviation à l'essor de la génétique, l'état des savoirs en ce début de XX<sup>e</sup> siècle.

### 33 Ces savants qui ont inspiré Einstein

Sans Galilée, Newton, Riemann... Einstein n'aurait pu concevoir sa théorie.

### 42 La genèse d'une théorie révolutionnaire

Récit des mois exaltants pendant lesquels Einstein a conçu la relativité générale.

### 50 Tout comprendre à la relativité

16 pages d'infographies qui expliquent ses origines, ses principes, ses conséquences.

### 68 Ces savants qu'Einstein a inspirés

La relativité générale a servi de socle aux travaux des contemporains d'Einstein.

### 74 Et Einstein recula devant son génie

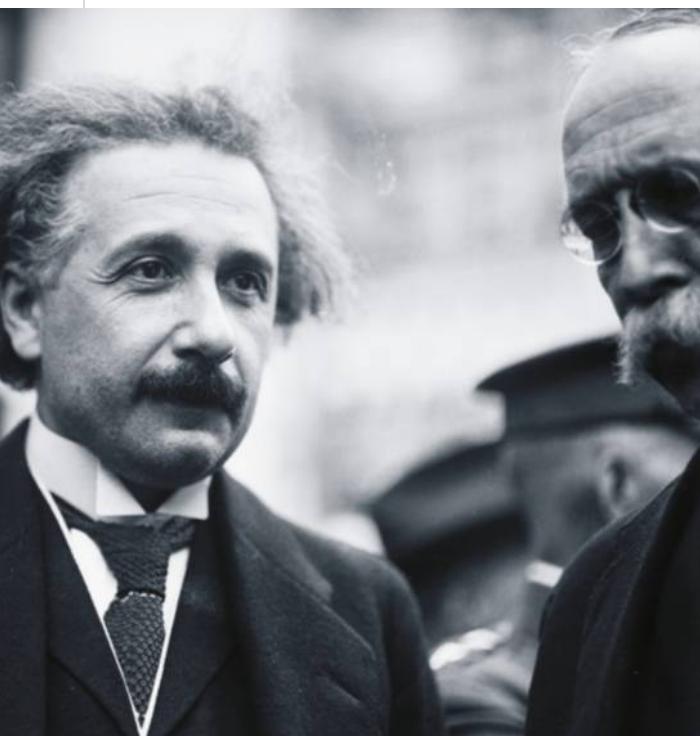
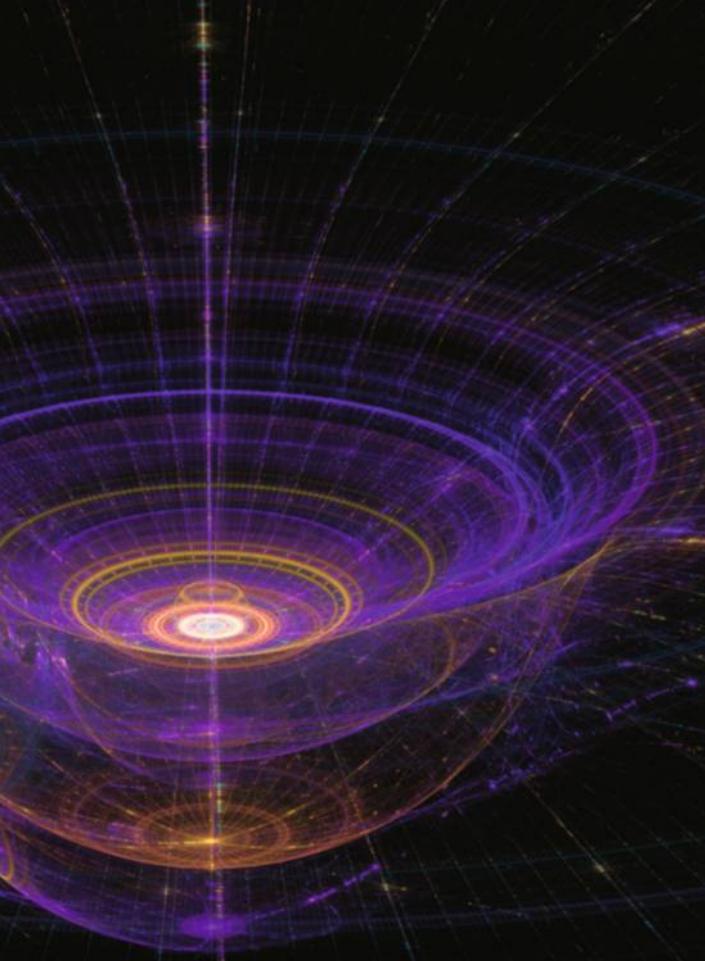
Alors qu'il a jeté les bases de la théorie quantique, Einstein n'a pu admettre son caractère probabiliste.

#### Recevez Science & Vie et ses Hors-Série

Votre bulletin d'abonnement se trouve en p. 109. Pour commander d'anciens numéros, rendez-vous sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com).

Vous pouvez aussi vous abonner par téléphone au 01 46 48 47 08 ou par Internet sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com)





## 2015 : LES ENJEUX

### 82 5 tests pour éprouver la relativité

Des expériences toujours plus sophistiquées sont en cours.

### 96 La gravitation à l'épreuve du microscopique

Pour rendre compte de la gravitation à toute petite échelle, il faudrait réunir relativité générale et mécanique quantique.

### 104 Où est passée la masse de l'Univers ?

Plus de 80 % de l'Univers seraient invisibles... à moins de revoir la théorie d'Einstein.

### 110 Pourquoi l'expansion s'accélère ?

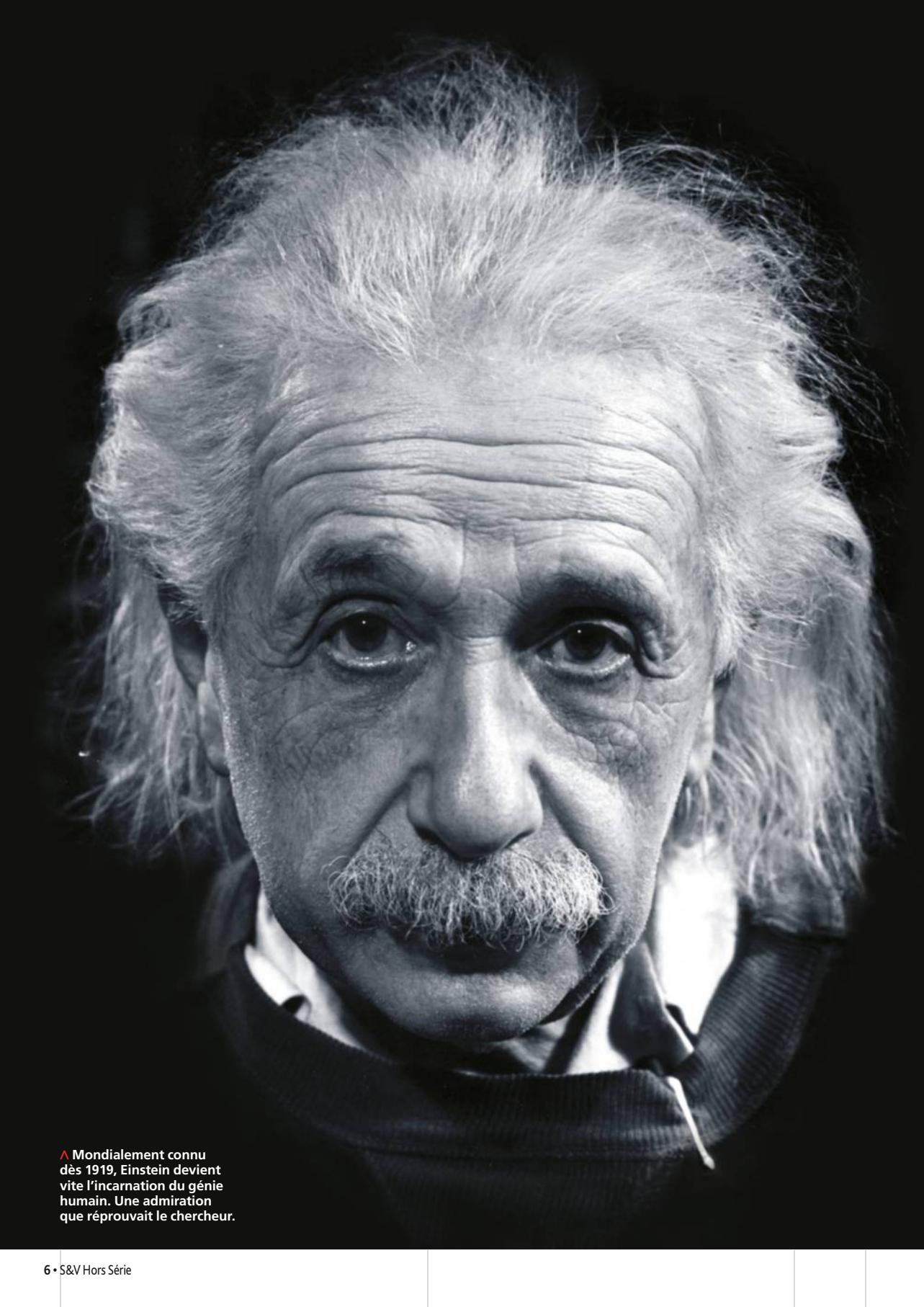
L'expansion accélérée de l'Univers pourrait enfin permettre de réfuter la relativité !

G. HITCH - LIBRARY OF CONGRESS - R. MARKOWITZ/NASA



### 118 Des jumeaux pour tester l'apesanteur

Grâce à deux astronautes jumeaux, l'un envoyé dans l'espace et l'autre resté sur Terre, la Nasa cherche à déterminer les conséquences de l'apesanteur sur l'organisme.



▲ Mondialement connu dès 1919, Einstein devient vite l'incarnation du génie humain. Une admiration que réprouvait le chercheur.

# *Les 11 piliers du mythe EINSTEIN*

Comment un obscur savant devient-il l'idole des foules ? Si Einstein doit sa célébrité à la confirmation de sa théorie, son culte repose sur des bases bien plus larges, qui vont du contexte politique de l'époque à sa personnalité propre.

PAR PHILIPPE TESTARD-VAILLANT

Appelez « Einstein » sur Google. Le moteur de recherche affiche 105 000 000 de pages ! Moins que pour le Christ et Newton, mais plus que pour Platon, Galilée, Vinci, Mozart, mais aussi Freud, Chaplin, Churchill, le Che et autres monstres sacrés du XX<sup>e</sup> siècle. Cent ans après l'avènement de la relativité générale, la renommée d'Einstein – désigné fin 1999 comme « personnalité du siècle » devant Roosevelt et Gandhi par le magazine américain Time, et consacré « plus grand héros de l'Histoire » par les étudiants de 37 pays début 2015 – reste vivace. Les ouvrages de vulgarisation ou d'histoire des sciences, les essais philosophiques, les romans policiers ou de science-fiction, les nouvelles... font leur miel de ce savant hors normes. Plus de 2000 livres, à ce jour, comportent le nom du physicien ! Et le théâtre n'est pas en reste. « *Avant même Einstein on the Beach, fameux spectacle de Bob Wilson sur une musique de Phil Glass, le dramaturge*

## Les 11 piliers du mythe Einstein

suisse alémanique Friedrich Dürrenmatt, dans sa pièce *Les physiciens*, a mis en scène un (faux) fou qui prétend se prendre pour Einstein. Et le dernier projet théâtral de Brecht, à peine ébauché, aurait été consacré à une Vie d'Einstein, suite et sans doute approfondissement de sa Vie de Galilée », témoigne le physicien et épistémologue Jean-Marc Lévy-Leblond, professeur émérite de l'université de Nice et auteur de *La Vitesse de l'ombre* (1), un livre dont un chapitre est consacré à la jungle de légendes qui entoure la personnalité d'Einstein.

### AUSSI POPULAIRE QUE MARILYN MONROE

Le cinéma et même le rock, le rap et la BD, sans parler de la publicité passée maître dans l'art de transformer l'image d'Einstein en kilomètres d'espèces sonnantes et trébuchantes, surfent eux aussi sur la renommée de l'inventeur de l'équation la plus célèbre de l'histoire des sciences. « *Il continue d'exister un "mythe Einstein", comparable à celui qui entoure la personnalité de Marilyn Monroe et alimenté à coups de T-shirts, posters et citations plus ou moins authentiques* », constate l'historienne des sciences et physicienne Françoise Balibar, professeure émérite de l'université Paris-Diderot et auteure d'*Einstein, la joie de la pensée* (2).

Les années passant, la légende einsteinienne persiste, même si « *elle tend à perdre un peu de sa substance, à se dessécher* », note pour sa part Jean-Marc Lévy-Leblond. La relativité n'exerce plus la séduction d'une révolution scientifique récente, l'expression « *Tout est relatif, comme dit Einstein* » est passée de mode, la cote d'icônes scientifiques comme l'astrophysicien Stephen Hawking ou le mathématicien Alan Turing ne cesse de grimper, et un gamin de 15 ans bon en sciences rêvera de devenir le nouveau Bill Gates ou le nouveau Steve Jobs plutôt que le nouvel Einstein. Pour autant, n'importe quel quidam pris au hasard dans la rue répondra « *Einstein* » si on lui demande le nom d'un ou d'une scientifique sans préciser sa nationalité, sa discipline et son époque. La force symbolique du nom et de l'image d'Einstein reste prégnante même si ses théories, à force d'être plus ou moins bien vulgarisées, ont perdu de leur mystère et de leur aura. »

Mais quand et comment est née et s'est développée la geste dont Einstein a été et reste le héros ? Présentation des onze briques qui ont servi à l'édification d'une légende riche d'aspects divers qui parle toujours au plus grand nombre. ●



## Une enfance singulière

Rien de tel, pour forger un mythe, qu'une enfance pas comme les autres, des signes précoce de singularité. Avec Einstein, les biographes sont servis ! Affligé d'une élocution balbutiante, d'un débit poussif et de la manie de répéter les mêmes mots à mi-voix, le petit Albert n'est pas un enfant prodige à la Mozart, ce qui rend d'autant plus fascinante son accession au statut d'homme-le-plus-intelligent-du-xx<sup>e</sup> siècle. Le petit garçon parle relativement tard et, comme l'écrit sa sœur Maja (ici, à ses côtés, vers 1893), « *son entourage se demande s'il y parviendra jamais* ». « *Une fable veut qu'il n'ait pas dit un mot jusqu'à vers l'âge de 3 ans et que ses premières paroles aient été : "Maman, passe-moi le sel s'il te plaît."* Ajoutant, devant l'emoi familial, qu'il s'était tu jusque-là parce ce que la soupe était assez salée », sourit Jean-Marc Lévy-Leblond. Einstein lui-même donnera corps à cette historiette en écrivant qu'« *un adulte normal ne s'arrête jamais pour penser aux problèmes de l'espace et du temps. Ce sont des choses auxquelles il a réfléchi dans son enfance. Moi, mon développement intellectuel a été retardé, de sorte que je n'ai commencé à m'interroger sur l'espace et le temps qu'une fois adulte.* »





# 2

## *L'incarnation du génie solitaire*

La relativité générale ?

Une théorie incompréhensible pour le commun des mortels ! Ce mantra, le mythe einsteinien l'a ressassé : les calculs sur les-

quels repose l'édifice relativiste sont si complexes, a longtemps affirmé la rumeur publique, que seules trois personnes dans le monde sont en mesure d'en comprendre les arcanes. La légende veut même qu'Arthur Eddington, l'astronome britannique qui apporte en 1919 la première confirmation expérimentale de la théorie, ait répondu au journaliste qui lui demandait ce qu'il en était : « *Je me demande bien qui est la troisième personne...* » Pour Françoise Balibar, la prétendue incompréhensibilité de la théorie d'Einstein est un aspect du mythe qui a vécu tant dans la sphère savante que dans la population jeune et éduquée. Certes, « *beaucoup de gens vont encore écouter des conférences sur Einstein comme on va à la messe, pour participer à un mystère,* reconnaît-elle. Mais en quelques heures un bachelier

*motivé peut grossièrement comprendre ce qu'est la relativité restreinte, et la relativité générale est enseignée aux étudiants de quatrième année de physique.* » Une fois descendu de son piédestal de mathématicien aux idées seulement accessibles à quelques privilégiés, Einstein n'en reste pas moins le prototype du génie scientifique, qui plus est du génie travaillant seul (ici, dans son bureau, à Berlin, en 1927), même si certains de ses travaux frayent la voie à la *big science* qui s'épanouira après la Seconde Guerre mondiale. « *Einstein, qui n'a jamais appartenu à une équipe de recherche, est le dernier des chercheurs isolés* », ajoute Françoise Balibar. Son mythe se construit au moment où la science en général, et la physique en particulier, « *passe du stade artisanal au stade industriel, celui du chercheur en équipe* », précise Jean-Marc Lévy-Leblond. *Einstein est un peu l'arbre qui cache la forêt d'une recherche qui s'institutionnalise, se hiérarchise, se lie de plus en plus au pouvoir politique. Il incarne dans l'inconscient collectif le savant à l'ancienne tel qu'il n'existe plus.* »

# 3

## Un anticonformisme à tout épreuve

Autre ingrédient clé du mythe Einstein : son allergie viscérale à l'autorité et à la discipline collective. Une indépendance d'esprit qu'il manifeste dès l'école, qu'il n'aime pas et qui ne l'aime pas. Les professeurs « *m'ont fait à l'école l'effet de sergents, et au lycée, de lieutenants* », se souviendra-t-il. Cette aversion pour le bourrage de crâne lui vaut l'hostilité de ses maîtres et cette appréciation de son professeur de grec : « *Einstein, vous n'arrivez jamais à rien !* » Citoyen suisse dès 1901 (ici, à Berne, au Bureau des brevets), il n'aura de cesse de « *penser par lui-même, dans tous les domaines*, analyse Françoise Balibar. *Il ne se laissera dicter sa conduite par aucune instance extérieure : tradition, parti politique, opinion bien-pensante... Ainsi, pacifiste convaincu, il défendra les objecteurs de conscience de 1918 à 1933. Mais après la prise du pouvoir par Hitler, il fera volte-face et expliquera que le nazisme doit être combattu par tous les moyens, y compris par les armes.* »



### → 14 mars 1879

Albert naît à Ulm, dans le Wurtemberg (Allemagne). Il est le premier enfant du couple Hermann et Pauline Einstein.

### → 1880

Il déménage à Munich où son père Hermann et son oncle Jakob dirigent une fabrique et un magasin d'articles électriques.

### → 1881

Naissance de sa sœur Maja.

### → 1884

Einstein reçoit en cadeau, pour ses 5 ans, une boussole qui lui inspire sa première investigation scientifique.

### → 1885-1888

Études primaires. Il excelle en sciences, mais se montre rétif à l'autorité. Il commence l'apprentissage du violon.

### → 1888-1894

Einstein étudie au Luitpold Gymnasium de Munich où règne une discipline quasi militaire. À l'âge de 12 ans, il lit un livre sur la géométrie d'Euclide qui, écrira-t-il plus tard, produit sur lui une « impression indescriptible ».

## → 1896

Einstein est admis (après avoir échoué une première fois à l'examen d'entrée) au Polytechnicum de Zurich (Suisse), l'une des meilleures écoles d'ingénieurs d'Europe. Il y rencontre Mileva Maric, d'origine serbe et non-juive.

## → 1901

Il obtient la nationalité suisse.

## → 1902

Mort de son père. Naissance de sa fille Lieserl, dont on perd rapidement la trace. Einstein est embauché comme expert technique de 3<sup>e</sup> classe au Bureau des brevets de Berne.

## → 1903

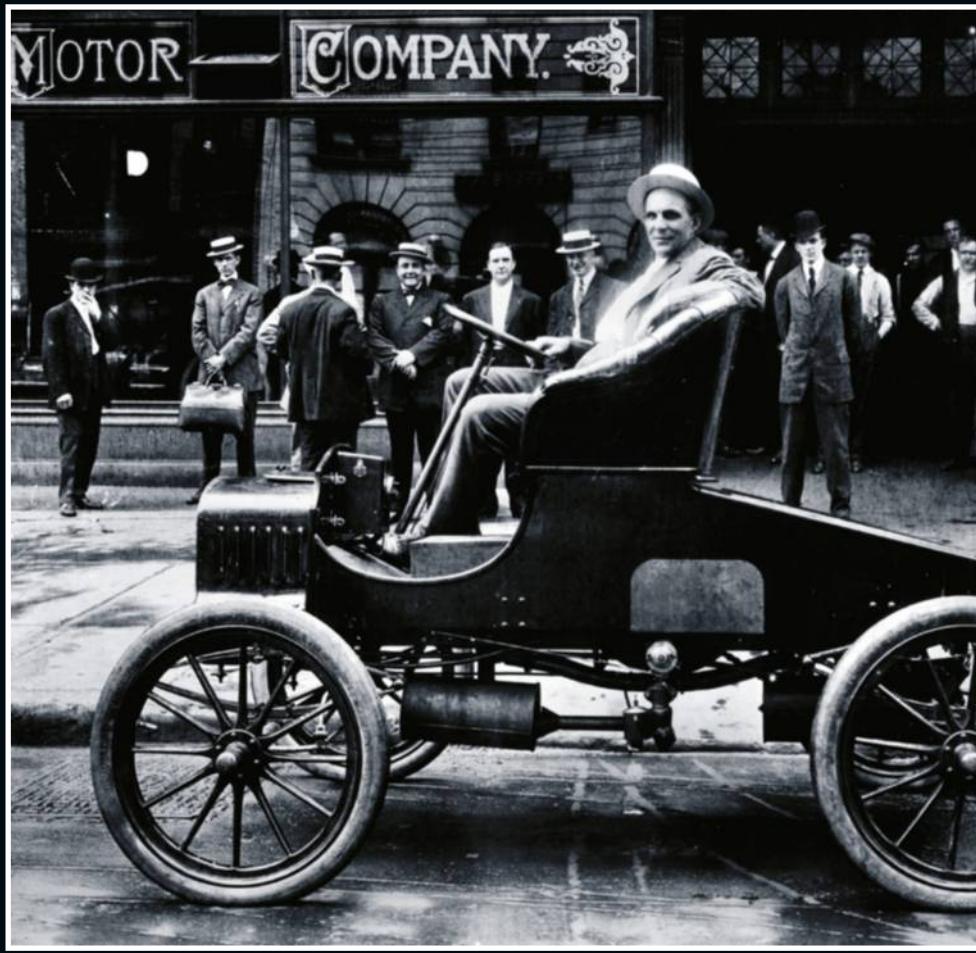
Il se marie civilement avec Mileva.

## → 1904

Naissance de son deuxième enfant, Hans-Albert (mort en 1973), qui deviendra professeur à l'université de Californie.

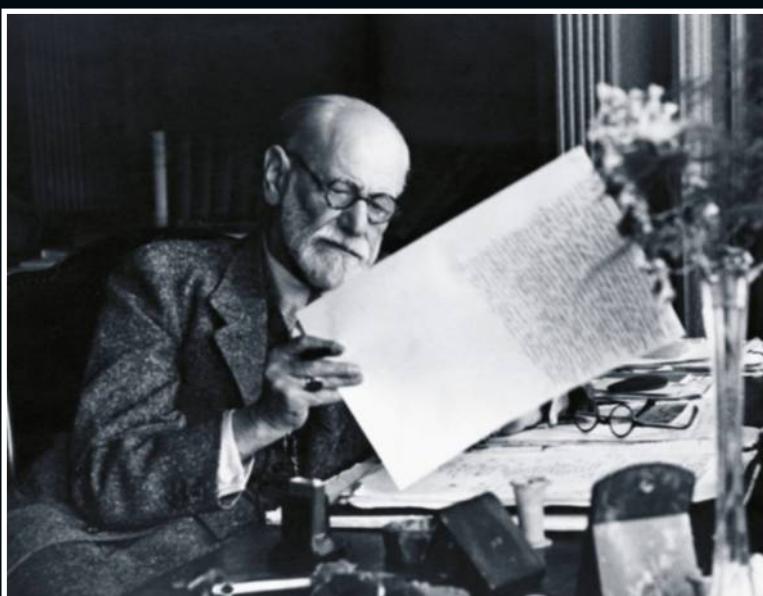
## → 1905

Einstein publie cinq articles historiques, dont un sur les quanta de lumière et un autre qui fonde la théorie de la relativité restreinte et qui contient la fameuse formule  $E = mc^2$ .



▲ Au début des années 1910, Henry Ford (ci-dessus) révolutionne l'industrie automobile avec le travail à la chaîne. Sa Ford T sera produite à plus de 15 millions d'exemplaires.

> À la même époque, Sigmund Freud (ci-contre) propose une nouvelle théorie des instances psychiques et une nouvelle approche thérapeutique: la psychanalyse.

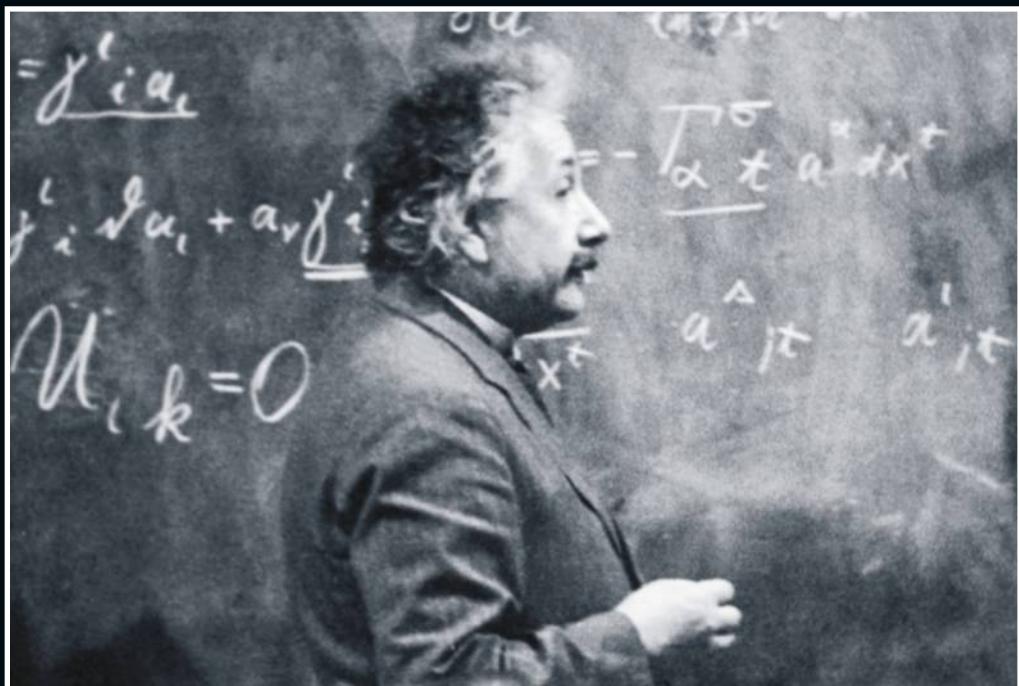




▲ En 1917, en Russie, les bolcheviks (avec Lénine à leur tête) s'emparent du pouvoir, lors de la révolution d'Octobre. La Russie soviétique devient le premier régime communiste de l'histoire.

## Une époque avide de nouveautés

Comment un obscur professeur d'université devient-il du jour au lendemain la nouvelle coqueluche des foules ? Certes, l'annonce, en novembre 1919, de la confirmation expérimentale de la théorie de la relativité générale propulse le nom d'Einstein à la une des journaux du monde entier. Mais le contexte politique est aussi pour beaucoup dans la fulgurante célébrité du physicien. Les relations restant des plus tendues entre les pays qui viennent de s'affronter pendant plus de 1560 jours, « *la nouvelle Allemagne de la République de Weimar, très isolée sur la scène diplomatique, utilise Einstein comme un joker pour rétablir sa renommée intellectuelle et culturelle* », relate Jean-Marc Lévy-Leblond. À chacune des étapes du véritable tour du monde qu'il effectue au début des années 1920 et au cours desquelles il est reçu par les plus hautes autorités, la notoriété d'Einstein, qui joue son rôle d'ambassadeur de la paix avec lucidité et sans illusions, s'accroît auprès du public. » La gloire qui auréole Einstein (on le reconnaît dans la rue, il reçoit un abondant courrier, est sollicité sur tous les sujets, est réclamé par Hollywood...) découle également de l'immense appétit pour les idées neuves que l'horrible mêlée des années 1914-1918 a fait naître. En saignant les populations, en déstabilisant les monnaies, en provoquant l'effondrement des monarchies et en faisant éclater les codes esthétiques, la boucherie fratricide dont l'Europe a été le théâtre a accouché d'un monde avide de nouveautés radicales, sur tous les plans : politique, économique, artistique, scientifique... Dans son roman *Sylvia*, l'homme de lettres et journaliste Emmanuel Berl explique ainsi que pour étancher cette soif de ruptures, « *les révolutionnaires ont Lénine, les industriels, Ford, les psychologues, Freud, et les savants, Einstein*. »



## 5 *Un sens inné de la formule*

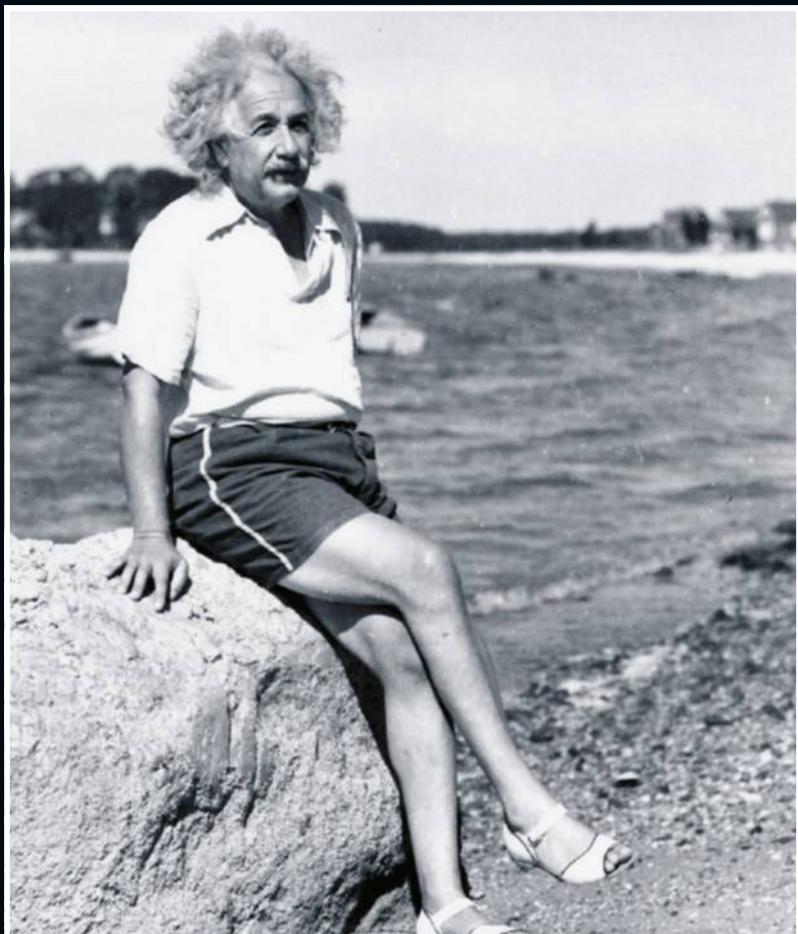
Même pour qui n'a qu'une très vague idée des travaux d'Einstein, le nom du physicien fait automatiquement penser à  $E = mc^2$ . Pilier du mythe einsteinien, cette formule est la plus connue – sinon la seule connue – de toute la physique moderne. Elle a acquis un statut emblématique. On la retrouve dans des titres de romans, dans des BD, sur des timbres, des vêtements, dans des émissions de télévision... « *Cette omniprésence est révélatrice de l'effacement des profanes devant la prétention de la science à ramasser les mystères de la nature en cinq petits signes*, considère Jean-Marc Lévy-Leblond. Il est évident que l'extrême brièveté et la simplicité apparente de cette équation expliquent son pouvoir totémique. Elle n'aurait jamais connu un tel succès si elle avait ressemblé à l'équation de Schrödinger:  $-\hbar^2/2m \Delta\Psi(r, t) \dots$  » Non moins important pour expliquer la postérité de ces cinq signes: le caractère choquant de certains aspects des théories relativistes.

« *Celles-ci mettent en question, non des propriétés ésotériques de la matière à l'échelle microscopique, mais l'espace et le temps, c'est-à-dire des concepts qui relèvent d'abord de la connaissance commune*, souligne Jean-Marc Lévy Leblond. Que la relativité bouleverse des notions qui forment le tissu quotidien de nos existences compte pour beaucoup dans la constitution du mythe einsteinien. » Auteur d'une équation gravée dans la mémoire collective, Einstein excelle aussi dans l'art de ciseler des maximes scientifico-philosophiques. « *La science sans la religion est boiteuse, la religion sans la science est aveugle* », lit-on dans son recueil d'articles *Comment je vois le monde*. Encore plus célèbre, la formule « *Dieu ne joue pas aux dés !* », proférée lors d'une conversation avec le physicien danois Niels Bohr, l'un des pères de la mécanique quantique, témoigne quant à elle de l'étonnement d'Einstein devant le monde de l'infiniment petit où il n'est pas possible de prévoir avec certitude la trajectoire d'une particule et où règne la probabilité, comme lors d'un lancer de dés.

# 6

## Un look décoiffant

Une fois lancée, au tout début des années 1920, plus rien n'arrête la légende einsteinienne. Parmi les facteurs qui contribuent à faire du physicien la coqueluche des médias, son look compte pour beaucoup. Avec ses cheveux en bataille comme en proie à l'électricité statique et sa moustache touffue, Einstein est un bon client pour les photographes dont il se fait volontiers le complice. Nombre d'images le montrent simplement vêtu d'un pantalon froissé, d'un vieux chandail, de sandales, et témoignent d'un côté bonhomme aux antipodes du savant gris et guindé. Sans parler du célèbre cliché réalisé en 1951, le jour de son 72<sup>e</sup> anniversaire, où on le voit tirer la langue comme un gamin effronté. Mais Einstein « ne cherche pas à faire des coups », assure Françoise Balibar. Cela le mettrait en avant et lui déplairait. S'il se sert de sa renommée, c'est pour faire avancer ses idéaux politiques d'intellectuel engagé : pacifisme, fondation d'un foyer juif en Palestine, lutte contre le maccarthysme... »



### → 1906

Einstein est nommé Privatdozent (*professeur non-salarié*) à l'université de Berne.

### → 1907

Il lui vient « L'idée la plus heureuse de [sa] vie ». Einstein réalise, en effet, que le champ gravitationnel n'a qu'une existence relative : un observateur en chute libre dans le vide n'a aucun moyen de se rendre compte de son mouvement et peut se considérer « au repos ». Il prédit aussi que la lumière doit être déviée au voisinage d'une masse.

### → 1909

Einstein devient professeur de physique théorique à l'université de Zurich.

### → 1910

Naissance de son deuxième fils, Eduard (mort en 1965), qui souffrira de graves problèmes psychologiques.

### → 1911

Einstein occupe une chaire de physique théorique à l'université allemande de Prague. Invité au premier congrès Solvay, en Belgique, il rencontre l'élite de la physique mondiale (dont Hendrik Lorentz, Max Planck, Marie Curie, Henri Poincaré et Paul Langevin).

### → 1912

Einstein collabore avec son ami Marcel Grossmann sur les fondements mathématiques de sa théorie.

### → 1914

Il prend la direction de l'institut de physique Kaiser-Wilhelm, à Berlin, à la veille de la guerre. De nationalité suisse, il échappe à la mobilisation et signe un manifeste appelant à l'arrêt des hostilités et à l'entente entre les peuples.

### → 1915

Il achève la structure logique de la relativité générale, une nouvelle théorie de la gravitation. Elle sera publiée l'année suivante.

### → 1918

Einstein soutient la République de Weimar.

### → 1919

Une éclipse solaire totale permet de vérifier les prédictions de la relativité générale concernant la déviation gravitationnelle des rayons lumineux. C'est le début de la célébrité d'Einstein auprès du grand public. Il divorce de Mileva et se remarie avec sa cousine Elsa.

▲ Einstein et Mileva Maric se sont rencontrés alors qu'ils étudiaient tous deux au Polytechnicum de Zurich. Or, dans des lettres qu'il envoie à son amie, le physicien évoque « notre travail sur la relativité ».

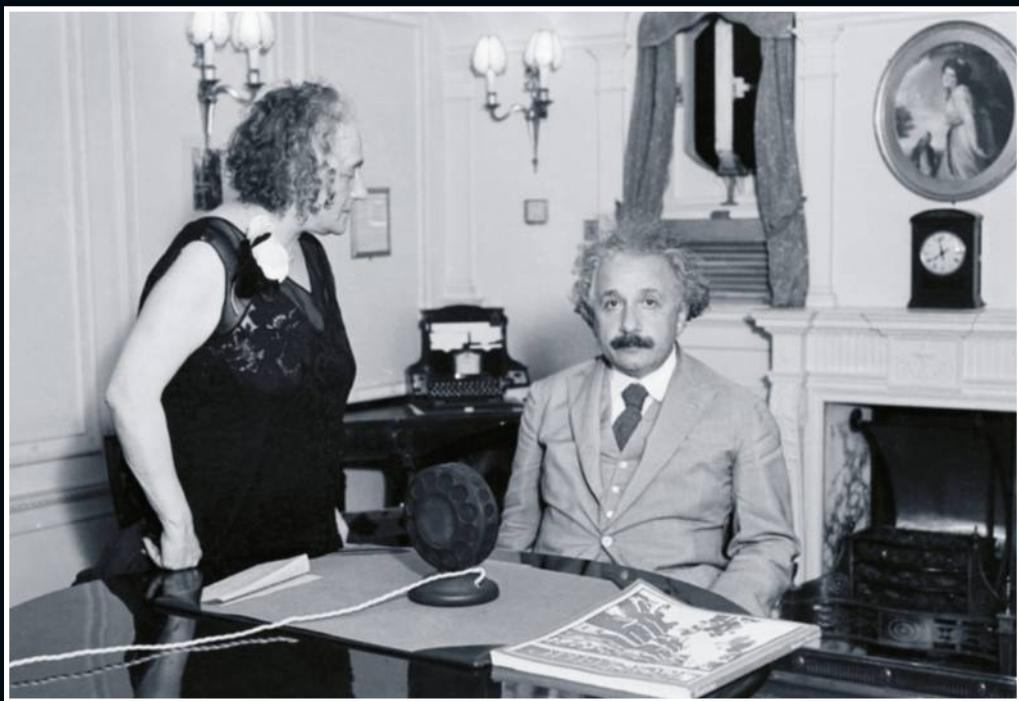




## *Une polémique au sujet de la contribution scientifique de sa femme*

Einstein a-t-il, comme l'affirment des on-dit tenaces, volé tout ou partie de la théorie de la relativité à sa première femme, Mileva ? De fait, au tout début de leur relation, unis par une grande complicité intellectuelle, les deux tourtereaux travaillent ensemble. Leur correspondance montre que Mileva contribue aux réflexions d'Albert, lesquelles préparent ses premiers articles, ceux-là mêmes qui déboucheront, en 1905, sur la théorie de la relativité et l'hypothèse des quanta de lumière. Mieux, dans ses lettres, le physicien évoque « *notre travail sur la relativité* » et parle de Mileva comme de sa main droite. De quoi enflammer les imaginations... D'autant qu'en 1922 Einstein remet à Mileva les 32 500 dollars qui accompagnent son prix Nobel de physique. « *Mileva encourage Einstein, car elle*

*comprend son travail scientifique, reconnaît Françoise Balibar. Mais elle ne produit elle-même aucun concept fondamental. On ne peut donc pas affirmer qu'Einstein et Mileva ont coconçu la théorie de la relativité. Évidemment, Einstein aurait pu la citer dans son article sur la relativité, ce qu'il n'a pas fait, alors qu'il rend hommage à son ancien condisciple Michele Besso avec qui il a eu de "fructueuses discussions". Mais peut-être considère-t-il que ses conversations avec Mileva relèvent de la sphère privée et n'ont pas à être rendues publiques. » Quant au fait de verser à Mileva l'intégralité du montant du prix Nobel, il résulte d'un contrat conclu en 1918 entre les deux époux, tombés d'accord pour divorcer. Mileva étant sans ressources, cette transaction avait pour but d'assurer sa sécurité matérielle et celle de leurs enfants.*



# 8

## *Des relations tourmentées avec les femmes*

De toutes les facettes du kaléidoscope einsteinien, celle concernant son comportement à l'égard des femmes est sans conteste la moins reluisante. En témoigne le mémorandum stupéfiant de machisme que le physicien adresse à son épouse Mileva en 1914, alors qu'il poursuit une liaison adultère mais souhaite éviter un divorce, à l'époque scandaleux :

*« A. Tu veilleras à ce que : 1) mes vêtements et mon linge soient maintenus en bon état; 2) il me soit servi trois repas par jour dans mon bureau; 3) ma chambre et mon bureau soient toujours bien tenus, et que ma table de travail ne soit touchée par nul autre que moi.*

*B. Tu abandonneras toute relation personnelle avec moi, hormis celles nécessaires à l'apparence sociale. Plus précisément, tu renonceras :*

*1) à ma présence à la maison avec toi; 2) à mes sorties et mes voyages avec toi.*

*C. Tu promettras explicitement d'observer*

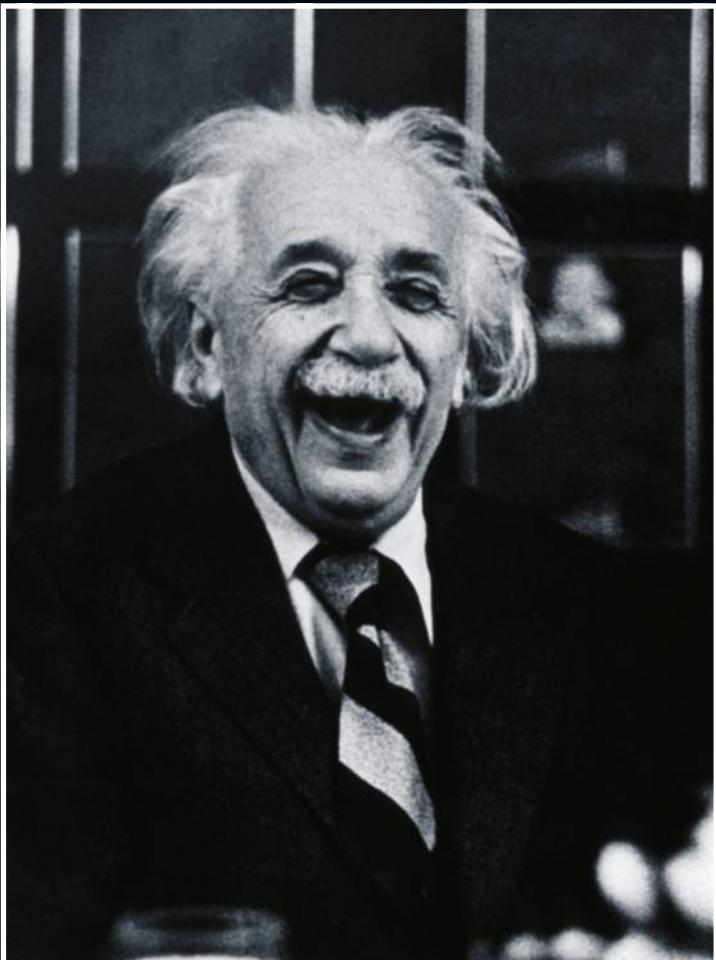
*les points suivants : 1) tu n'espéreras aucune affection de ma part et ne m'approcheras en aucune façon; 2) tu me répondras immédiatement lorsque je t'adresserai la parole; 3) tu quitteras ma chambre ou mon bureau immédiatement et sans protester lorsque je te le demanderai; 4) tu promettras de ne pas me dénigrer aux yeux de mes enfants, ni par des mots ni par des actes. »* Sitôt séparé de Mileva, Einstein se réconfortera auprès de sa cousine Elsa (ici, en 1932, treize ans après leur mariage), « non sans avoir hésité entre elle et sa fille Ilse » confie Jean-Marc Lévy-Leblond. Plus tard, la gloire faisant voler une nuée de jolies femmes autour de son mari, Elsa fermera les yeux sur ses affaires extraconjugales. Tout indique, par ailleurs, que pendant la Seconde Guerre mondiale Einstein a entretenu une liaison avec une espionne soviétique, Margarita Konenkova, et qu'à Princeton il fréquentait des prostituées. Comme le résume sobrement Françoise Balibar, « Einstein n'était pas monogame ».

# 9

## Un sérieux sens de l'humour

Qu'ils soient authentiques ou, le plus souvent, apocryphes, les bons mots que l'on prête à Einstein sont légion et font crépiter le feu de sa légende.

Des exemples ? À Edgar Meyer, un physicien suisse, en janvier 1915 : « Pourquoi m'écrivez-vous "Dieu devrait punir les Anglais" ? Je n'ai de relation privilégiée ni avec l'un ni avec les autres. » En mars 1931, à l'expéditeur d'un manuscrit sans intérêt : « Au sujet de vos publications, le professeur Einstein vous prie de le considérer pour l'instant comme mort. » Un humour qui peut presque tourner au mauvais goût, comme à la fin de sa vie, lorsqu'il répond au grand chanteur noir Paul Robeson qui s'enquiert de son état de santé : « Je vais plutôt bien. Après tout, j'ai survécu victorieusement au nazisme et à deux femmes. »



### → 1920

Einstein fait l'objet d'attaques anti-sémites. Le journal Tägliche Rundschau traite la théorie de la relativité de « grand bluff » et Einstein de « plaignaire ».

### → 1921-1925

Il accomplit un véritable tour du monde (États-Unis, France, Japon, Palestine, Amérique du Sud...).

### → 1922

Il reçoit le prix Nobel de physique au titre de l'année 1921 et remet à son ex-femme Mileva la prime qui accompagne cette distinction.

### → 1923

Il démissionne de la Commission de coopération intellectuelle de la Société des Nations pour protester contre l'occupation de la Ruhr par les troupes françaises et belges. Il se ravisera et y reviendra l'année suivante, pour en démissionner définitivement en 1932.

### → 1928

Einstein est élu président de la Ligue des droits de l'Homme.

### → 1931

Einstein propose à Freud de former une « communauté intellectuelle de haut niveau » destinée à peser sur les décisions politiques.

### → 1933

Il quitte définitivement l'Europe et trouve refuge à Princeton (États-Unis), à l'Institute for Advanced Study.

### → 1934

Il aide de nombreux Juifs allemands à se réfugier aux États-Unis. Il expose sa vision de la science et de la condition humaine dans le livre Comment je vois le monde.

### → 1936

Mort d'Elsa.

### → 1939

Einstein écrit au président américain Roosevelt pour le prévenir du péril que représenterait la mise au point par l'Allemagne nazie d'une bombe atomique.

### → 1940

Il est naturalisé américain.

### → 1945

Il adresse en mars une nouvelle lettre au président américain pour l'adjurer de recevoir les physiciens opposés à l'emploi de l'arme atomique.





► Un enfant né avant mariage qui disparaît rapidement, un fils interné en hôpital psychiatrique (Eduard, à g.) et, peut-être, une fille cachée, la propre fille adoptive de son fils aîné Hans-Albert (ci-dessus) : la vie familiale du brillant scientifique est remplie de zones d'ombre.

## Une atmosphère de mystère autour de ses enfants

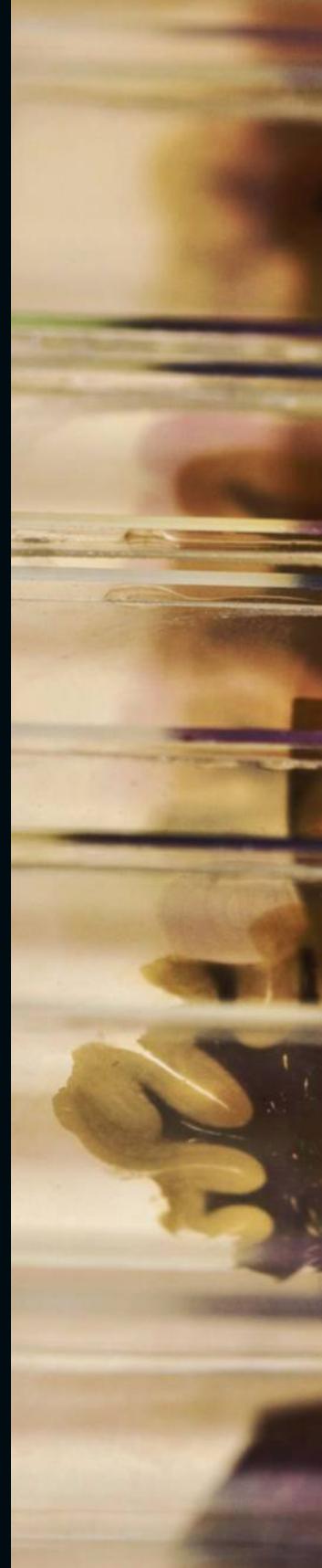
Parmi les zones d'ombre qui résistent aux biographies d'Einstein, celle concernant le sort de sa fille Lieserl, née en 1902, est particulièrement troublante. Dès septembre 1903, les enquêteurs perdent la trace de l'enfant que Mileva a mis au monde chez sa mère, en Serbie, du côté de Belgrade. Est-elle morte en bas âge ? A-t-elle été abandonnée à sa naissance ? Einstein l'a-t-il revue ? Était-elle encore vivante au moment du décès du physicien en 1955, mais ignorante de son identité ? Impossible de répondre, faute de preuves. « *Un mystère encore plus épais entoure Evelyn Einstein, née en 1941 et réputée être la fille adoptive de Hans-Albert, le fils aîné*

*d'Einstein*, ajoute Jean-Marc Lévy-Leblond. *Divers éléments rendent plausible qu'elle ait été le fruit d'une liaison tardive d'Albert, qui aurait imposé à son fils de l'élever.* » Une hypothèse d'autant plus crédible que l'éducation de sa progéniture n'a jamais été la priorité d'Einstein. Hans-Albert en témoignera une fois devenu adulte et installé sur la côte ouest des États-Unis, aussi loin que possible de son géniteur : « *Je ne pense pas que mon père ait montré un intérêt particulier pour mon frère et pour moi lorsque nous étions de simples enfants.* » Vis-à-vis de son fils cadet, Eduard, diagnostiqué schizophrène à l'âge de 20 ans, Einstein se montre désespoiré. « *Mon fils est le seul problème qui demeure sans solution* », écrit le physicien en 1952, plus enclin à aimer l'humanité en général que des individus singuliers, dont ses proches. Interné pour la première fois à la clinique psychiatrique de Zurich (Suisse) à l'automne 1932, Eduard y séjournera au total quatorze ans, et y mourra sans avoir revu son père depuis trente ans. « *Einstein est manifestement plus motivé par le travail de la pensée, son œuvre scientifique, que par les rapports humains* », en conclut Jean-Marc Lévy-Leblond. À supposer qu'il soit bien l'auteur de cette phrase, tempère Françoise Balibar, « *on peut interpréter celle-ci comme la preuve que, pour lui, les choses de l'intellect sont plus faciles à régler que les questions relevant de la vie personnelle. Einstein est quelqu'un qui ne se confie à personne, ce n'est vraiment pas un champion de l'empathie. Ainsi, à l'annonce du suicide, le 25 septembre 1933, du physicien autrichien Paul Ehrenfest, son ami le plus cher, il écrit une lettre qui manque singulièrement d'émotion. De même, la mort de sa femme Elsa, en décembre 1936, ne semble pas le plonger dans une affliction profonde.* »



## Un cerveau devenu relique

« *Un objet mythique.* » Voilà comment Roland Barthes désigne le cerveau du théoricien de la relativité dans ses *Mythologies*, parues en 1957, peu après la mort d'Einstein. « *Peut-être à cause de sa spécialisation mathématique* », écrit-il, Einstein apparaît au grand public comme « *un organe supérieur, prodigieux, [qui] produit de la pensée continûment, comme le moulin de la farine.* » Dans ce texte, commente Jean-Marc Lévy-Leblond, « *Barthes insiste sur le fait que dans la conception populaire du mythe einsteinien, plus qu'un homme, Einstein est perçu comme une machine à penser* » qui débite des équations de la même façon que le foie fabrique de la bile. La mythification du cerveau d'Einstein commence en fait de son vivant. En 1951, le physicien accepte de se soumettre à une séance d'électroencéphalogrammes durant laquelle il doit se concentrer sur la résolution d'équations. Les médecins espèrent ainsi mieux comprendre les bases neuro-anatomiques de l'intelligence humaine. Mais « *quand les expérimentateurs, intrigués par des tracés anormaux, l'interrogent sur ses pensées de l'instant, il leur répond qu'il vient de se rappeler qu'il pleut et qu'il a oublié son parapluie* », s'amuse Jean-Marc Lévy-Leblond. De nombreux fantasmes proliféreront autour du « trésor » prélevé au lendemain du décès d'Einstein à l'hôpital de Princeton, découpé en 240 morceaux (photos) et conservé des décennies durant par le docteur Thomas Harvey sans l'autorisation de la famille du défunt ni de son exécuteur testamentaire. L'examen des échantillons et des photos de la précieuse relique révèle une quantité de cellules gliales (essentielles à la transmission des signaux entre neurones) supérieure à la moyenne, un lobe pariétal inférieur (centre de la pensée mathématique et de l'imagerie spatiale) très large et des connexions entre les lobes frontal et pariétal très courtes. Mais aucune étude n'a permis d'expliquer pourquoi Einstein et ses dizaines de milliards de neurones ont conçu  $E = mc^2$ . Pour de nombreux chercheurs en neurosciences, tenter d'établir un lien organique entre le degré d'intelligence et les caractéristiques anatomiques de telle ou telle aire cérébrale relève de la « *neuro-mythologie* ».





### → 1946

Einstein accepte la présidence du Comité d'urgence des savants atomistes, qui se donne pour mission d'informer le public des dangers posés par l'énergie atomique. Il rédige ses Notes autobiographiques, qui paraîtront en 1949.

### → 1949

Einstein est ovationné par 300 scientifiques réunis à l'université de Princeton pour son 70<sup>e</sup> anniversaire.

### → 1952

Il refuse la présidence de l'État d'Israël au motif qu'il n'a « ni l'aptitude, ni l'expérience requise en matière de rapports humains dans l'exercice de fonctions officielles ».

### → 1953

Il prend le parti des victimes du maccarthysme et demande au président des États-Unis de gracier les époux Rosenberg, condamnés à mort pour espionnage atomique.

### → 1955

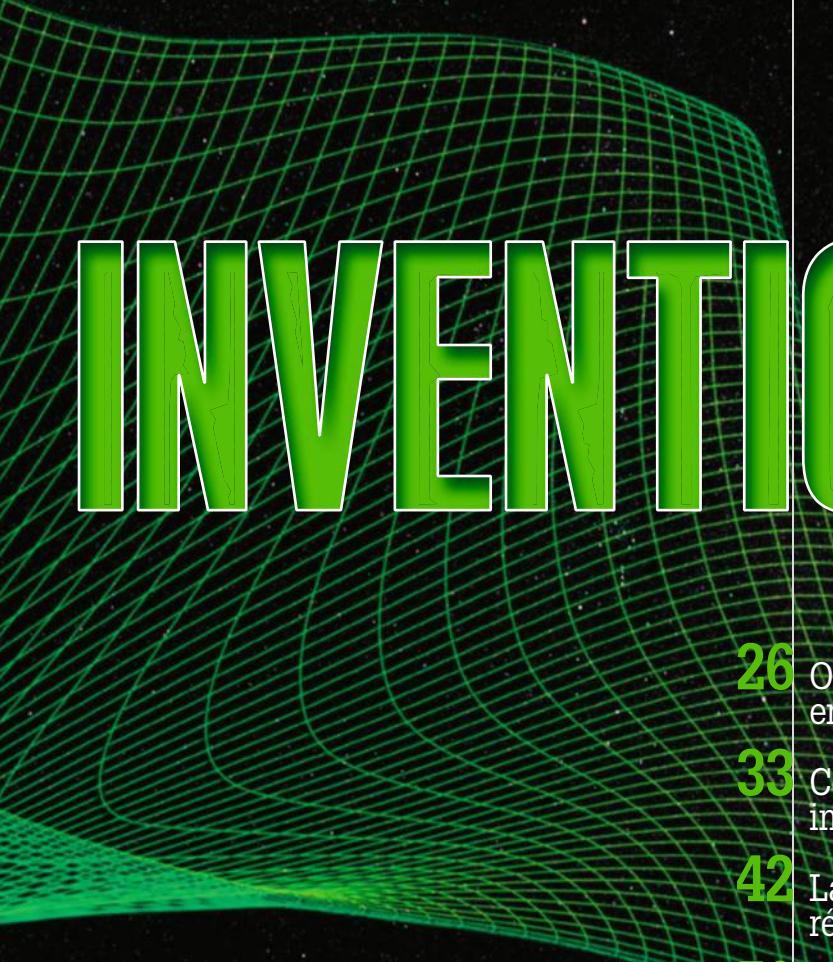
Le 11 avril, Einstein signe un appel pour le désarmement nucléaire. Il décède le 18 avril, à l'âge de 73 ans, d'une rupture d'anévrisme. Son cerveau est prélevé en secret par le docteur Thomas Harvey.

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

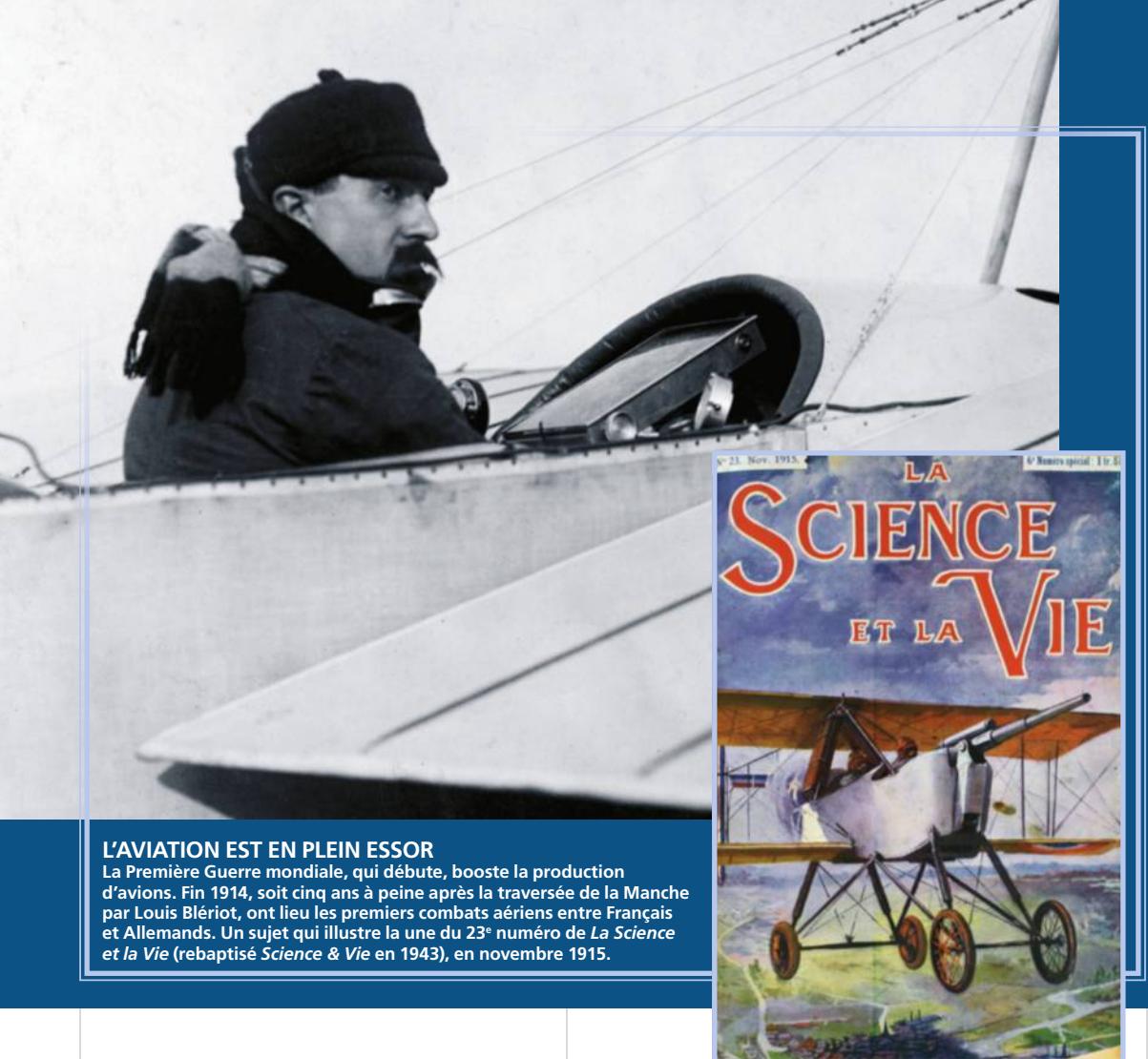
1915 SON



# INVENTION



- 26** Où en était la science en 1915?
- 33** Ces savants qui ont inspiré Einstein
- 42** La genèse d'une théorie révolutionnaire
- 50** Tout comprendre à la relativité
- 68** Ces savants qu'Einstein a inspirés
- 74** Et Einstein recula devant son génie

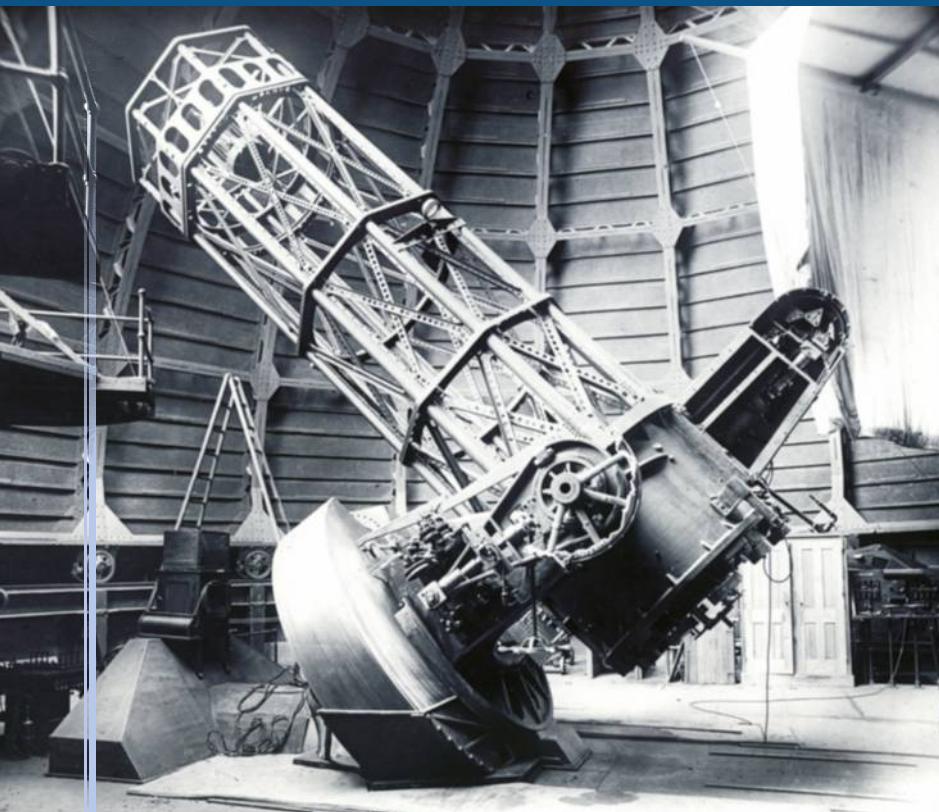


#### L'AVIATION EST EN PLEIN ESSOR

La Première Guerre mondiale, qui débute, booste la production d'avions. Fin 1914, soit cinq ans à peine après la traversée de la Manche par Louis Blériot, ont lieu les premiers combats aériens entre Français et Allemands. Un sujet qui illustre la une du 23<sup>e</sup> numéro de *La Science et la Vie* (rebaptisé *Science & Vie* en 1943), en novembre 1915.

## ASTRONOMIE, BIOLOGIE, PHYSIQUE...

# Où en était la science en 1915 ?



## LE PREMIER GRAND TÉLESCOPE

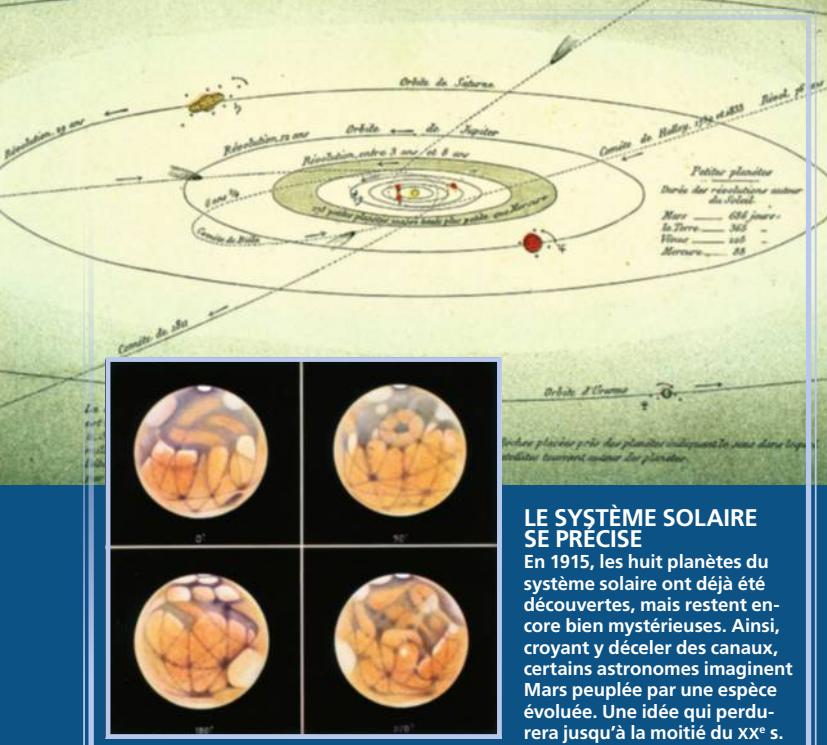
En ce début du XX<sup>e</sup> siècle, la connaissance du système solaire et de l'Univers est encore très parcellaire. Mais les premiers grands télescopes (ici, celui du mont Wilson, aux États-Unis, mis en service en 1908) vont permettre des avancées spectaculaires. Ainsi, l'observation des taches solaires débouche sur la découverte de champs magnétiques intenses.

À l'époque où Einstein formule sa théorie, l'aviation vient de prendre son envol, la dérive des continents est tout juste décrite et l'Univers se cantonne à la Voie lactée. Flash-back sur l'état des connaissances scientifiques en ce début de XX<sup>e</sup> siècle.

PAR PIERRE-YVES BOQUET

**E**n formulant sa théorie de la relativité générale en 1915, Einstein est entré dans l'histoire. Mais dans quel contexte historique se trouvait-il lui-même à ce moment-là ? Au niveau géopolitique, le monde – et l'Europe en particulier – est déjà déchiré par la Grande Guerre, issue d'un conflit entre l'Autriche-Hongrie et la Serbie à la suite de l'assassinat de l'archiduc François-Ferdinand d'Autriche, le 28 juin 1914. Au-delà de ce tragique décor de fond, quel était le paysage scientifique de l'époque ? Que savait-on de la Terre et de sa place dans l'Univers ? Du corps humain et de la médecine ? Des atomes et de la chimie ? Quelles théories faisaient consensus ou, au contraire, suscitaient la controverse ?

On s'en doute, en cent ans, la science a bien évolué. Et parfois plus encore qu'on ne l'imagine. Pour s'en convaincre, il suffit de se pencher sur les technologies d'alors. Au moment où Einstein formule sa théorie, l'automobile n'en est encore qu'à



### LE SYSTÈME SOLAIRE SE PRÉCISE

En 1915, les huit planètes du système solaire ont déjà été découvertes, mais restent encore bien mystérieuses. Ainsi, croyant y déceler des canaux, certains astronomes imaginent Mars peuplée par une espèce évoluée. Une idée qui perdura jusqu'à la moitié du XX<sup>e</sup> s.

**CAP SUR L'ANTARCTIQUE!**  
1915 est aussi l'époque des grandes expéditions scientifiques vers le continent austral, dernière *terra incognita*. Celle du Britannique Ernest Shackleton (à d., sur la photo), lancée en 1914, ne se terminera qu'en 1917, après la destruction de l'*Endurance* par les glaces, suivie d'un périple digne de l'exploit dans des conditions extrêmes.



ses débuts : Henri Ford a lancé la production en série de la Ford T en 1908. Ce principe révolutionnaire de fabrication à la chaîne ne sera importé en France par André Citroën qu'en 1919. Pour l'aviation, c'est la glorieuse époque des pionniers : à la fin de 1914 ont lieu les tout premiers combats aériens de l'histoire, entre des appareils français et allemands. Il faut dire que Blériot n'a traversé la Manche que cinq ans plus tôt, le 25 juillet 1909 ! En novembre 1915, l'aviation militaire fait d'ailleurs la une du 23<sup>e</sup> numéro du magazine de vulgarisation

chimiste français Jean Perrin (fondateur du Palais de la Découverte en 1937 et du CNRS en 1939) de son livre intitulé *Les Atomes*. Il y décrit de multiples expériences rendant le concept irréfutable. Dans la foulée, 1913 voit la naissance du « modèle de Bohr » (du physicien danois Niels Bohr) décrivant la constitution de l'atome : un noyau entouré d'orbites circulaires symbolisant les différents niveaux d'énergie des électrons. Bohr est d'ailleurs aussi, à cette période, l'un des nombreux opposants à la théorie du quantum de lumière formulée par Einstein en 1905

## Les années 1910 sont une période riche en découvertes pour la compréhension de la formation de la Terre et le calcul de son âge

scientifique *La Science et la Vie* (rebaptisé *Science & Vie* en 1943), né deux ans plus tôt.

Du côté des sciences fondamentales (qui vont être profondément marquées par les travaux d'Einstein), la théorie atomiste, qui stipule que la matière est composée de particules élémentaires inséparables, les atomes, est tout juste en train de s'imposer. Certes, elle n'est pas nouvelle : le Grec Démocrite la défendait déjà quatre siècles avant notre ère. Mais elle est discutée et ne devient vraiment dominante qu'en 1913, avec la publication par le physicien et

et selon laquelle la lumière serait formée de particules (que l'on n'appelle pas encore « photons »).

« La théorie des quanta n'est pas prise au sérieux, et la théorie corpusculaire de la lumière peine à s'imposer face à la théorie ondulatoire dominante à l'époque, depuis les équations de Maxwell. À part Einstein et une poignée d'autres, personne n'y croira avant les années 1920 », explique Olivier Darrigol, spécialiste de l'histoire des sciences et chercheur associé à l'université de Berkeley (États-Unis). L'avènement de la théorie atomiste confirme



par ailleurs les travaux du physicien autrichien Ludwig Boltzmann qui, dans les années 1870, planche sur la théorie de la cinématique des gaz. Grâce à ses travaux, il devient possible de faire le lien entre des phénomènes macroscopiques (comme le fonctionnement de la machine à vapeur, moteur de la révolution industrielle du XIX<sup>e</sup> siècle) et l'échelle microscopique. Une véritable révolution, comme le souligne Emmanuel Bertrand, maître de conférences à l'ESPCI Paris-Tech et chercheur en histoire des sciences au centre Alexandre-Koyré : « *Tout ce que l'on considérait comme indémontrable théoriquement, comme le premier principe de la thermodynamique [la conservation de l'énergie, formulée par Mayer en 1845], le devient.* »

### UNE LISTE DE 23 PROBLÈMES À RÉSOUTRE

Quant aux mathématiques, pour avoir une vision des connaissances de l'époque, il suffit de se plonger dans le discours prononcé par l'un des plus grands mathématiciens du XX<sup>e</sup> siècle, l'Allemand David Hilbert, en ouverture de la deuxième conférence internationale des mathématiciens de Paris, en 1900. Il recense 23 casse-tête résistant aux mathématiciens qu'Hilbert juge suffisamment importants pour les désigner comme des pistes de

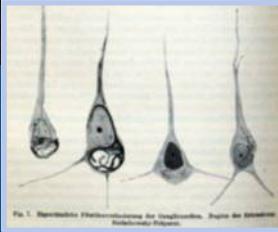
recherches prioritaires pour le siècle à venir (voir encadré p. 32). Une liste connue depuis sous l'appellation des « problèmes de Hilbert ». « Beaucoup de travaux ont été entrepris au XX<sup>e</sup> siècle pour tenter de résoudre ces problèmes, dont certains résistent encore à ce jour », indique Catherine Goldstein, mathématicienne et historienne des sciences mathématiques à l'Institut de mathématiques de Jussieu-Paris Rive gauche. Cette liste reste donc largement d'actualité en 1915 : seuls deux ou trois problèmes sont résolus ou en passe de l'être à cette date. Au-delà de cette liste, « l'époque est marquée par une tendance à l'axiomatisation de la géométrie et des probabilités, ajoute Catherine Goldstein. Et par le sentiment de l'existence d'une unité des mathématiques : tout est relié, et des résultats apparemment abstraits peuvent avoir des applications pratiques. »

Dans un tout autre domaine, la connaissance de la Terre, du système solaire et de sa place dans l'Univers est elle aussi encore très parcellaire. Les années 1910 correspondent précisément à une période riche en découvertes pour la compréhension de la formation de la Terre et le calcul de son âge. « *Les progrès en chimie, puis la découverte de la radioactivité et des isotopes permet de réaliser*

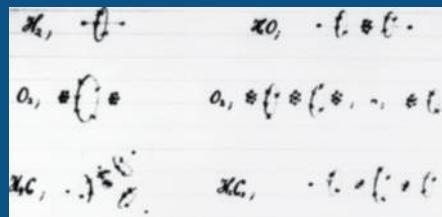
1915 : l'invention



**ALZHEIMER DÉCRYPTE LA DÉMENCE**  
En 1906, Alois Alzheimer (ici, assis à g., en compagnie d'autres chercheurs, à l'université de Munich) décrit la maladie neurodégénérative qui porte son nom. Ses dessins reproduisent précisément ses observations au microscope de neurones aux divers stades de la maladie.



**LA STRUCTURE DE L'ATOME RÉVÉLÉE**  
Grâce aux travaux du Français Jean Perrin, publiés en 1913, la théorie atomiste (qui stipule que la matière est composée de particules élémentaires insécables, les atomes) n'est plus discutable. La même année, le physicien danois Niels Bohr décrit la constitution de l'atome : un noyau entouré d'orbites circulaires symbolisant les différents niveaux d'énergie des électrons.



#### LE SYSTÈME NERVEUX EST DÉCRIT EN DÉTAIL

Coluréat du prix Nobel de médecine en 1906 avec Camillo Golgi, le médecin espagnol Santiago Ramón y Cajal dévoila la structure du système nerveux. Il mit notamment en évidence que les neurones étaient des entités cellulaires séparées par de fins espaces, les « synapses ».

SPL COSMOS - BBML - COURTESY AIP, SECRETE VISUAL ARCHIVES - J. VIGNE/KHARINE TAPABOR - AMERICAN PHILOSOPHICAL SOCIETY  
des datations géologiques, comme celles d'Arthur Holmes qui, en 1911, parvient à dater le Carbonifère, le Dévonien et le Silurien avec une remarquable précision », rappelle Pascal Richet, physicien à l'Institut de physique du globe de Paris et membre du Comité français d'histoire de la géologie. Mais la principale avancée est, sans conteste, la publication de *La Genèse des continents et des océans*, en 1915, par Alfred Wegener. Le climatologue allemand y décrit le mécanisme de la dérive des continents, autrefois réunis au sein d'un « supercontinent » qu'il appelle la Pangée. L'idée mettra toutefois du

## L'invasion de la chimie en médecine ouvre des perspectives thérapeutiques énormes, issues de la pharmacologie

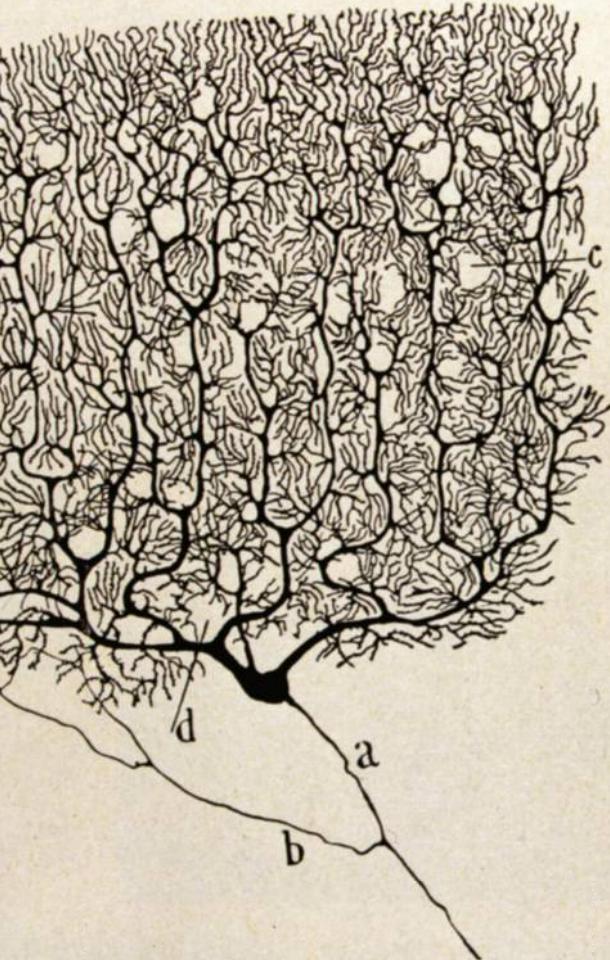
temps à être admise. Elle donnera finalement naissance, en 1960, à la théorie de la tectonique des plaques expliquant la dynamique de la lithosphère, la couche rigide superficielle de la Terre.

En ce début de XX<sup>e</sup> siècle, certaines parties du globe restent encore à explorer. C'est en particulier l'ère des grandes expéditions vers l'Antarctique, à la découverte de ce que les scientifiques considèrent comme la dernière *terra incognita*. À l'instar de la célèbre et épique expédition Endurance, du

Britannique Ernest Shackleton, lancée en 1914 dans le but de traverser l'Antarctique d'un bout à l'autre. Elle ne se terminera finalement qu'en 1917, après la destruction du voilier, emprisonné puis écrasé par les glaces fin 1915, suivie d'un périple digne de l'exploit dans des conditions extrêmes, au cours duquel tout l'équipage sera sauvé.

Une partie du système solaire demeure également inconnue : les huit planètes ont déjà été découvertes, mais la planète naine Pluton ne le sera qu'en 1930. « En 1915, on n'a recensé que 200 ou 300 astéroïdes, alors qu'on en dénombre près de

600 000 aujourd'hui. Quant aux comètes, on les observe, mais on ne sait ni ce qu'elles sont ni d'où elles viennent », relève Christian Nitschelm, professeur associé en astronomie à l'université d'Antofagasta, au Chili. L'époque est aussi marquée par des questionnements sur le fonctionnement du Soleil : quelle est sa source d'énergie, quelle sera sa durée de vie ? Ces questions alimentent la controverse au XIX<sup>e</sup> siècle, et commencent tout juste à trouver des réponses avec Ernest Rutherford. En 1904, le



**FIG. 6. — Cellule de Purkinje ; homme adulte.**  
Méthode de Golgi.

physicien néo-zélandais britannique suggère que la radioactivité est la source de l'énergie solaire.

Plus étonnant, certains astronomes, comme le Français Camille Flammarion, pensent qu'il y a probablement une vie sur Mars, en se basant sur l'observation de grandes traces qu'ils prennent pour des canaux creusés par une espèce probablement plus évoluée que la nôtre. « *Il y a une controverse très violente entre les pro-canaux et ceux qui pensent, à raison, que ces traces ne sont qu'une illusion d'optique, des traces d'impact qui, vues de loin, peuvent sembler former des lignes* », précise Christian Nitschelm. La controverse perdurera pendant toute la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

La place de notre étoile dans l'Univers fait elle aussi l'objet de vifs débats. « *En 1915, il y a encore des hypothèses catastrophistes qui suggèrent que le système solaire est né par accident, d'une collision entre le Soleil et une autre étoile, et qu'il serait*



#### L'EXISTENCE DES CHROMOSOMES EST DÉMONTRÉE

Le généticien américain Thomas Hunt Morgan valide, en 1915, la théorie chromosomique de l'hérédité. À partir de l'étude de la transmission des caractères de milliers de drosophiles (mouche du vinaigre), il construit les premières cartes de localisation des gènes sur les chromosomes.

donc unique », reprend Christian Nitschelm. La connaissance est limitée par la taille et la qualité des instruments. Le plus gros télescope en fonction est le télescope de 1,5 mètre de diamètre du mont Wilson en Californie, installé en 1908. Celui de 2,5 mètres, prévu pour ce même site, est encore en construction et ne sera mis en service qu'en 1917. Pour la plupart des astronomes, l'Univers se limite donc à la Voie lactée. Il faudra attendre que l'astronome américain Edwin Hubble découvre en 1924, grâce au second télescope du mont Wilson, que la Grande Nébuleuse d'Andromède est formée d'étoiles, et qu'elle constitue donc une autre galaxie, pour que la preuve soit établie que l'Univers est bien plus vaste qu'on ne l'imaginait jusqu'alors.

#### COMMERCIALISATION DE L'ASPIRINE

La biologie et la médecine sont également à un tournant de leur histoire. En 1915, la psychanalyse est en plein essor : les théories de Sigmund Freud (qui a publié son *Interprétation des rêves* en 1900) diffusent largement et aboutissent à la création de l'Association psychanalytique internationale en 1910. Au moment même où la médecine connaît une autre petite révolution : « *Cette époque est caractérisée par l'invasion de la chimie*

*en médecine* », retrace Jean-Claude Dupont, professeur d'histoire des sciences à l'université de Picardie-Jules-Verne. Un mouvement qui ouvre des perspectives thérapeutiques énormes, issues de la pharmacologie. La fin de l'année 1914 voit ainsi les débuts de la commercialisation de l'aspirine. « *C'est aussi une ère de fort développement de la biochimie, avec la découverte des hormones qui conduira, par exemple, à l'isolation de l'insuline dans les années 1920* », ajoute Jean-Claude Dupont. On observe aussi un changement de paradigme : on n'appréhende plus les organes séparément, l'organisme commence à être considéré comme un tout. « *La biologie devient une biologie des corrélations* », résume Jean-Claude Dupont.

### QUERELLE AUTOUR DE L'INFLUX NERVEUX

Ceci dit, le cerveau est un objet d'études qui fascine particulièrement les chercheurs. La théorie du neurone (le désignant comme l'unité structurelle et fonctionnelle du système nerveux), issue des travaux de Santiago Ramon y Cajal, s'impose à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. « *La période 1900-1915 est assez riche en neurosciences, avec la mise en place d'une biologie cellulaire du neurone* », détaille Jean-Gaël Barbara, neurobiologiste et historien des sciences. Alois Alzheimer vient tout juste de décrire la maladie dégénérative qui porte son nom, en 1906. En ce début du XX<sup>e</sup> siècle, les neurosciences sont également traversées par une polémique, formulée avant la guerre, sur le fonctionnement de la transmission nerveuse. « *Jusqu'ici, la théorie électrique est dominante : l'influx nerveux serait basé sur l'électricité. On en est aux prémisses de la théorie chimique. Le débat deviendra vite sensible dans la communauté scientifique, car il détermine aussi qui, des physi-*

## L'essor de la génétique s'accompagne d'un fort courant eugéniste qui se poursuivra jusqu'à la Seconde Guerre mondiale

*ciens ou des chimistes, pratiquera la médecine* », rappelle Jean-Claude Dupont.

L'époque est également marquée par les débuts de la génétique avec la publication simultanée, par Walter Sutton et Theodor Boveri, de la théorie chromosomique de l'hérédité qui stipule que le patrimoine génétique est porté par les chromosomes (la description de l'ADN attendra 1953). L'essor de la génétique s'accompagne alors d'un fort courant eugéniste, visant à améliorer le patrimoine génétique de l'espèce humaine grâce aux progrès de la science. Une tendance qui se poursuivra jusqu'à

## DEUX VISIONS DES MATHÉMATIQUES

La guerre va exacerber un conflit larvé entre la France et l'Allemagne, qui dominent les mathématiques à l'époque. « *De chaque côté du Rhin, on pense que l'on pratique des mathématiques différentes. Ce qui, avec le recul, n'est pas flagrant* », commente Catherine Goldstein, historienne des mathématiques. Les Allemands défendent une approche abstraite et théorique ; les Français, des mathématiques intuitives ayant des applications pratiques. Ainsi, au congrès international de mathématique de 1897, Henri Poincaré célèbre la capacité des mathématiques à expliquer l'Univers, alors qu'au congrès suivant, en 1900, David Hilbert énonce une liste des « 23 problèmes »,

« caractérisée par des notions abstraites, peu ancrées dans la réalité. C'est un peu une réponse du berger à la bergère », analyse Catherine Goldstein. Cette rivalité atteindra son point d'orgue avec le « Manifeste des 93 », signé en octobre 1914 par 93 intellectuels allemands (dont de nombreux scientifiques) officialisant leur soutien à l'armée allemande, en train d'envahir la France. S'en suivra en France un vif mouvement de critiques de la science allemande, rappelle Catherine Goldstein : « *Einstein tombe en plein dans cette période d'hostilités et, en France, sa théorie sera d'abord perçue comme une vision "allemande" de la physique, abstraite et réductrice*. »

la Seconde Guerre mondiale, avant d'être prohibée dans de nombreux pays développés.

La première guerre mondiale aura, au final, un double effet sur la science. Elle gèle une partie des recherches en mobilisant les chercheurs dans l'effort de guerre. « *Il est presque surprenant qu'une théorie aussi forte que celle de la relativité générale ait pu être formulée à une telle époque* », remarque Olivier Darrigol. Mais elle sera aussi un puissant stimulateur pour de nombreuses disciplines, de la chirurgie

et de la radiographie à rayons X (pour soigner les blessés) à la naissance du sonar (pour détecter les sous-marins), en passant par la chimie (avec le développement d'armes chimiques) ou encore la mécanique des fluides (avec les travaux de l'Allemand Ludwig Prandtl sur l'aérodynamisme).

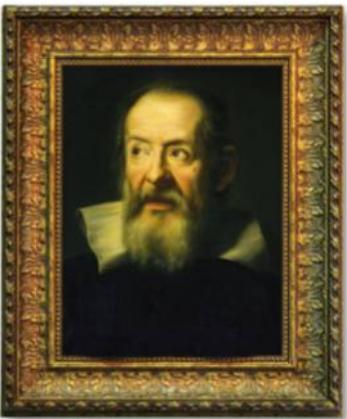
Une chose est sûre : la théorie d'Einstein va faire date et permettre des avancées majeures dans de nombreux champs scientifiques : la thermodynamique, les mathématiques, l'astrophysique, la cosmologie, la mécanique quantique, la physique nucléaire... Mais c'est une autre histoire. ●



# *Ces savants qui ont inspiré Einstein*

Sans l'œuvre de ses prédécesseurs, Einstein n'aurait jamais pu concevoir sa théorie. Galilée et la relativité des mouvements, Newton et la gravitation, Maxwell et l'électromagnétisme... Portrait de ces géants de la physique auxquels la relativité doit presque tout.

PAR ROMÁN IKONICOFF

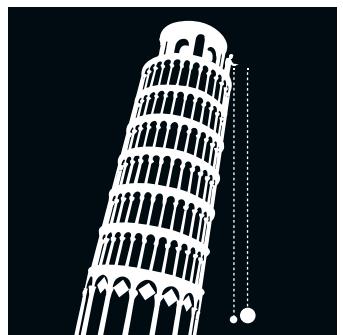


## GALILÉE LE PIONNIER DE LA RELATIVITÉ

GALILEO GALILEI (1564-1642).  
LE SAVANT ITALIEN EST LE FONDATEUR  
DE LA PHYSIQUE MODERNE.

Trois siècles séparent l'Allemand Einstein du Pisan Galilée. Malgré tout, Galilée est, pour Einstein, un compagnon de route très présent dans sa théorie de la relativité. Et pour cause : il est l'inventeur du principe de relativité des mouvements. Il le formule en 1632 dans son *Dialogue concernant les deux plus grands systèmes du monde*, sous la forme d'une poétique expérience de pensée (une rêverie rationnelle de physique dont il est l'inventeur et qui s'est imposée dans la pratique de la physique).

Galilée écrit : « *Enfermez-vous avec un ami à l'intérieur d'un grand bateau et prenez avec vous des mouches, des papillons et d'autres petits animaux volants [...]. Le bateau à l'arrêt, observez soigneusement comment les petits animaux volent à des vitesses égales vers tous les côtés de la cabine. [...] Si vous lancez quelque chose à votre ami, vous n'avez pas besoin de le lancer plus fort dans une direction que dans une autre [...]. Lorsque vous aurez observé toutes ces choses [...], faites avancer le bateau à l'allure qui vous plaira, pourvu que la vitesse soit uniforme et ne fluctue pas de part et d'autre. Vous ne verrez pas le moindre changement dans aucun des effets mentionnés et même aucun d'eux ne vous permettra de dire si le bateau est en mouvement ou à l'arrêt...* » Autrement dit, dans un repère en déplacement rectiligne uniforme (trajectoire droite et vitesse constante), les lois du mouvement sont les mêmes que si le repère était fixe, et l'observateur peut croire qu'il est immobile. Le principe posé, Galilée établit la loi de composition des vitesses qui permet par l'imagination (et les mathématiques) de passer d'un observateur à l'autre. Il se figure ainsi deux individus décrivant le mouvement d'un boulet de canon lâché du haut du mât du navire. Si le premier, sur le bateau, le voit tomber en ligne droite, le second, depuis le rivage, le voit décrire une parabole résultant de la superposition des deux mouvements du boulet : celui, horizontal, lié au déplacement du navire, et celui, vertical, lié à l'attraction terrestre. Einstein sera tout aussi inspiré par l'expérience de pensée « de la tour de Pise », tirée du *Discours concernant deux sciences nouvelles* de 1638. Galilée y prouve par le pur raisonnement que tous les corps chutent avec la même vitesse accélérée, quelle que soit leur masse. Une étrangeté physique que seul Einstein réussira à expliquer.



À partir de sa célèbre expérience de pensée « de la tour de Pise », Galilée établit la loi de la chute des corps : dans le vide, tous les corps tombent à une même vitesse accélérée.



## NEWTON LE PREMIER THÉORICIEN DE LA GRAVITATION

ISAAC NEWTON (1642-1727).

LE PHYSICIEN ANGLAIS EST LE PÈRE  
DE L'ATTRACTION UNIVERSELLE.

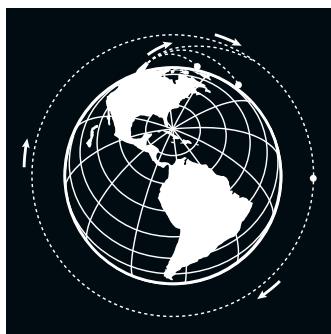
En 1687, Newton lègue à l'humanité sa théorie de la gravitation universelle comprenant (entre autres) la loi de l'attraction gravitationnelle. Celle-ci, qui s'applique partout dans l'Univers, dit que les corps exercent les uns sur les autres des forces d'attraction, dont il donne l'expression mathématique en fonction de leurs masses et de leur distance.

Mais à Einstein en particulier, qui admirait tant « *cet esprit éblouissant qui a montré, comme nul autre, ni avant ni après, ne l'a fait, le chemin de la pensée occidentale, de la recherche comme de la pratique* », Newton laisse aussi des problèmes fondamentaux. Le premier est l'absurdité de l'idée de « force à distance » dans l'espace vide puisque, pensait-on à l'époque, toute force se propage à travers un milieu. Newton l'écrit d'ailleurs, dans une lettre, en 1692 : « *Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, en sorte qu'un corps puisse agir sur un autre à distance au travers du vide, sans médiation d'autre chose [...], est pour moi une absurdité dont je crois qu'aucun homme, ayant la faculté de raisonner de façon compétente [...], puisse jamais se rendre coupable.* »

Le deuxième écueil, aperçu par certains philosophes de l'époque comme Leibniz, en Allemagne, ou Berkeley, en Irlande, est le présupposé (uniquement justifié par l'intuition de Newton) que tous les phénomènes physiques se déroulent dans un espace et un temps absolus. Ceux-ci seraient des entités extérieures aux contingences du monde. « *L'espace absolu, sans relation aux choses externes, demeure toujours similaire et immobile* », écrit Newton dans les « Définitions » de son ouvrage de 1687, les *Principia*. Cet espace, lui reprochera-t-on, ne respecte pas la troisième loi de la mécanique (que Newton a lui-même découverte !), celle dite d'action-réaction car les actions des masses n'entraînent, ici,

aucune réaction de l'espace absolu qui les contient. Ces deux fissures de la théorie engendrent un débat multiséculaire et l'émergence d'un nouveau concept, celui « d'éther ». Aussi multiforme que mal défini, impalpable et de nature inconnue, l'éther envahit les théories physiques. Jusqu'à ce qu'Einstein montre que l'espace et le temps, loin d'être absolus, n'existent pas séparément. Seul l'espace-temps a une réalité physique. Il varie, d'ailleurs, en fonction de la présence de matière, et sa géométrie « supporte » les ondes lumineuses, sans besoin d'éther...

Tiré par un canon, un boulet chutera plus ou moins loin selon sa vitesse, et pourra même se mettre en orbite de la Terre. Pour Newton, la chute des objets et le mouvement des astres obéissent en effet à la même loi : la gravitation.





## RIEMANN L'AUTEUR D'UNE NOUVELLE GÉOMÉTRIE

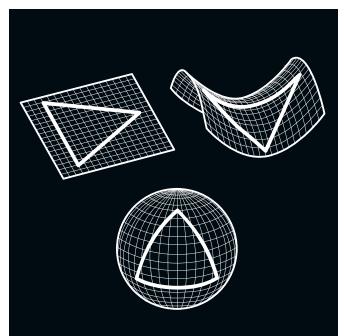
GEORG FRIEDRICH BERNHARD RIEMANN  
(1826-1866). LE MATHÉMATICIEN ALLEMAND A  
JETÉ LES BASES GÉOMÉTRIQUES DE LA RELATIVITÉ.

L'Allemand Georg Riemann est le premier d'une lignée de mathématiciens qui ont apporté à Einstein les outils formels pour penser la relativité générale. Il est en effet celui qui élabore, en 1854, le concept d'espace courbe dont Einstein montrera en 1915, à l'étonnement général, qu'il s'applique à la topologie de notre espace et de l'Univers.

Pour se représenter cette courbure de l'espace physique, il faut passer par l'analogie et imaginer des êtres plats à 2 dimensions vivant sur une surface courbe, une sphère, par exemple. Pour eux, cette surface est l'espace. Or, ici, les lois usuelles de la géométrie classique (dite « euclidienne ») n'ont pas cours : par exemple, la somme des angles des triangles n'est plus égale à  $180^\circ$ , mais supérieure. Il suffit de tracer un triangle sur un ballon pour le vérifier, et pour constater que ce dépassement est d'autant plus grand que la courbure est forte : il sera ainsi plus important à la surface d'une balle de ping-pong qu'à celle d'un ballon de basket. De fait, ce dépassement donne la mesure directe de la courbure de la surface sur laquelle le triangle est tracé.

Ce point (le fait qu'il soit possible de mesurer la courbure de toute surface à partir du « comportement » de ses figures géométriques) fut démontré en 1818 par le mathématicien allemand Friedrich Gauss. Son « théorème remarquable » dit, en effet, que la courbure s'obtient par des mesures intrinsèques à la surface : les êtres plats n'ont pas à sortir de leur espace à 2 dimensions pour la mesurer – ils seraient tout aussi incapables de le faire que nous de sortir de notre espace en 3 dimensions. Des années plus tard, Gauss chargerait son thésard Georg Riemann de généraliser son résultat aux espaces à plus de 2 dimensions et de trouver les lois régnant globalement la géométrie de chaque type d'espace. L'élève l'accomplit en 1854, dans sa thèse *Sur les hypothèses sous-jacentes à la géométrie*, donnant ainsi naissance à la géométrie différentielle, qui inspirera Einstein.

C'est grâce à cette géométrie que celui-ci comprend l'essence de l'espace physique et de l'Univers : il est courbe, même si localement (par exemple, à l'échelle du système solaire) il semble euclidien. Pour Einstein, la géométrie de Riemann est le cadre formel, le seul possible, dans lequel il doit déployer ses équations de la relativité générale.



En 1854, Riemann élabora le concept d'espace courbe (espace dans lequel la somme des angles d'un triangle n'est plus égale à  $180^\circ$ , mais inférieure ou supérieure), pour lequel il invente la géométrie différentielle.



## MAXWELL LE DÉCOUVREUR DE LA NATURE DE LA LUMIÈRE

JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879).  
LE PHYSICIEN ÉCOSSAIS EST LE PÈRE  
DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME.

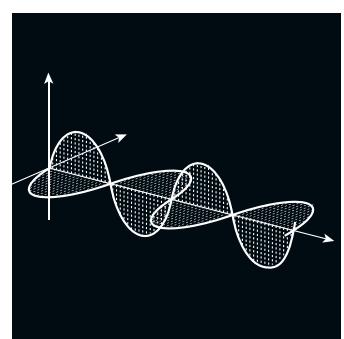
Einstein disait de ce savant écossais que son œuvre était la plus profonde et la plus fructueuse depuis Newton. Maxwell fut l'auteur de la deuxième « grande unification » de la physique. Après Newton, qui fusionna les mécaniques terrestre (mouvement et chute libre) et céleste (gravitation), Maxwell accomplit en 1865 l'union de l'électricité et du magnétisme. Sa théorie de l'électromagnétisme est un système de 4 équations dont chacune mêle des grandeurs électriques et magnétiques.

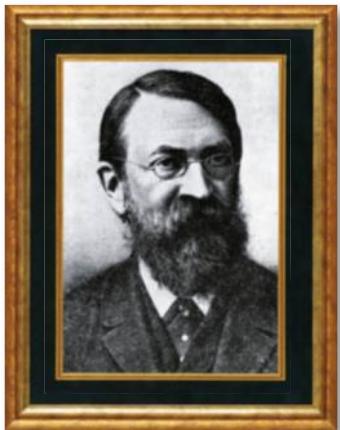
Les équations sont courtes et les rôles qu'y jouent les grandeurs magnétiques et électriques sont quasiment symétriques, d'où la beauté de cette théorie synthétique, englobant tous les phénomènes magnétiques et électriques. Cerise sur le gâteau, Maxwell trouve une solution particulière de son système d'équations : la lumière. Celle-ci y apparaît comme une onde « électromagnétique » progressive formée par un champ magnétique et un champ électrique oscillants. L'unification est donc triple : électricité, magnétisme et lumière sont fusionnés. C'est un choc et un ravissement pour les physiciens de l'époque.

Mais cette belle théorie, par son formalisme si pur et abstrait, fera naître de multiples interprétations, qui toutes intégreront un élément extérieur : l'éther. Car à l'instar de la force gravitationnelle de Newton, les champs et ondes électromagnétiques doivent, pensent les savants, avoir un support matériel pour se déployer ou se propager. L'éther, toujours attaché à l'espace absolu newtonien, y trouve un terreau fertile. Mais les physiciens ne parviennent pas à lui trouver une description cohérente : tantôt la Terre et les astres le traversent sans le perturber, tantôt il épouse localement leur mouvement... Aucun modèle n'est satisfaisant.

Par ailleurs, la théorie de Maxwell a ses limites : si elle exprime bien les relations entre charge électrique, champ, etc., elle ne dit rien de ce qu'est l'électricité ni de la manière dont elle interagit avec la matière. Par ailleurs, elle semble indépendante de la théorie de Newton, comme s'il existait une coupure entre la physique de la matière et celle des phénomènes électromagnétiques. Pourtant, c'est bien la première qui engendre les seconds via l'électricité... Einstein rétablira l'équilibre en les mariant dans son article sur la relativité restreinte, intitulé fort à propos : *De l'électrodynamique des corps en mouvement*. Une nouvelle unification.

Maxwell est celui qui a montré que la lumière était une onde électromagnétique, formée par un champ magnétique et un champ électrique oscillant dans deux plans perpendiculaires.





## MACH LE POURFENDEUR DE L'ESPACE ABSOLU

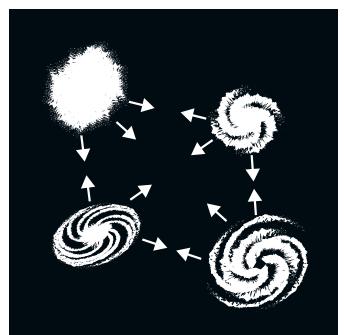
ERNST MACH (1838-1916). LE PHILOSOPHE ET PHYSICIEN AUTRICHIEN A ÉLABORÉ UNE THÉORIE INTÉGRANT LA DISTRIBUTION DE LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS.

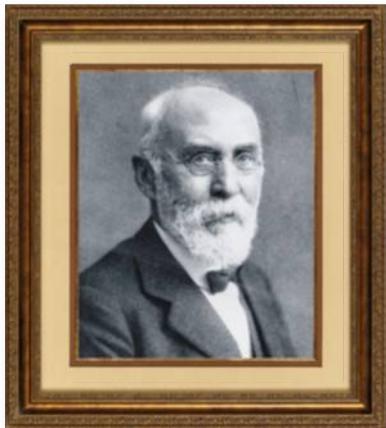
Einstein s'est toujours revendiqué « machien », fidèle à la pensée du philosophe et physicien autrichien Ernst Mach. Il a construit la relativité générale pour répondre aux questions fondamentales de Mach et formulé un « principe de Mach » dérivé de la pensée de celui qu'il considérait comme un maître. De fait, Mach a beaucoup influencé les scientifiques. En ce qui concerne la relativité, c'est sa critique féroce de l'espace absolu de Newton qui a éclairé Einstein.

Dans sa théorie, le savant britannique illustre son concept d'espace absolu en prenant l'exemple d'un seau d'eau que l'on ferait tourner de plus en plus vite. L'eau en rotation prend alors la forme concave d'une parabole inversée. Newton souligne que ce creux atteint son maximum quand l'eau et le seau tournent à la même vitesse, et en tire la conclusion suivante : puisque, dans ce cas, l'eau et le seau sont immobiles l'un par rapport à l'autre, la rotation imprégnant cette forme à l'eau se fait par rapport à l'espace absolu et non pas aux parois du seau.

Mais Mach est convaincu, à la suite du philosophe et scientifique allemand Leibniz, qu'une bonne théorie physique est celle qui décrit uniquement des relations entre phénomènes ou objets physiques. Or, grâce à l'espace absolu, Newton explique un phénomène, la courbure de l'eau dans le seau, comme s'il n'était en relation avec aucun autre. De même, l'inertie d'un corps (son aptitude à résister aux changements), que Newton lie à l'espace absolu, se présente comme une propriété inhérente au corps lui-même, sans relation avec un autre phénomène physique. Mach va alors opposer un contre-argument : la forme de l'eau s'explique par l'influence de toutes les autres masses de l'Univers. Que se passerait-il, demande Mach, si au lieu du seau, les étoiles se mettaient à tourner ? La même chose, répond-il : l'eau s'incurverait. L'inertie est également une conséquence des relations entre masses, comme l'exprime Einstein : « *Il ne peut y avoir d'inertie par rapport à l'espace, mais seulement une inertie des masses les unes par rapport aux autres.* » En pratique, sa théorie intégrera les paramètres de la distribution de matière dans l'Univers. Mais Einstein ira plus loin dans son attachement intellectuel à Mach en faisant de l'espace et du temps (regroupés en une seule entité physique) des phénomènes « relationnels », car intimement liés à la matière et l'énergie, qui les déforment...

Prenant le contre-pied de Newton, qui considère l'inertie des objets matériels comme une propriété intrinsèque, Mach y voit l'influence de l'ensemble des autres masses présentes dans l'Univers.





## LORENTZ CELUI QUI A MARIÉ LA MATIÈRE ET LES ONDES

HENDRIK ANTOON LORENTZ (1853-1928).  
LE PHYSICIEN NÉERLANDAIS A CONÇU  
UNE THÉORIE ÉLECTRONIQUE DE LA MATIÈRE.

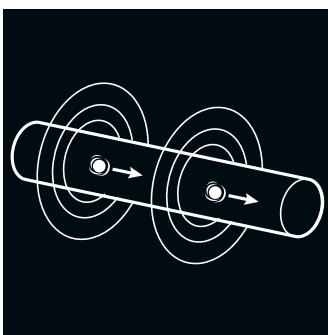
Einstein citait le Néerlandais Lorentz parmi les savants qu'il admirait, et la relativité restreinte fut, au début, baptisée « théorie d'Einstein-Lorentz ». C'est dire l'intrication intellectuelle des deux hommes...

Comme nombre de savants de la fin du xix<sup>e</sup> siècle, Lorentz veut marier

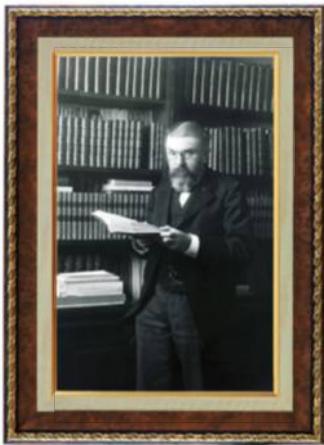
la théorie de Newton à l'électromagnétisme de Maxwell. Il cherche donc à relier la nature granulaire et discontinue de l'électricité, que l'on soupçonne d'être constituée de particules de matière en mouvement, au phénomène de champ électromagnétique, dont on pense alors qu'il se déploie dans un « éther ». Et propose une théorie microscopique de l'électromagnétisme qui fascinera Einstein. Pour Lorentz, les électrons, qui ont une charge électrique et une masse, engendrent des champs du fait de leur inertie : à l'instar d'un corps massif dont l'inertie s'oppose à toute modification de son état, un électron en mouvement exprime son inertie en déployant

un champ magnétique. Lorentz trouve ainsi un lien entre la mécanique newtonienne et l'électromagnétisme.

Problème, la lumière ne semble pas respecter le principe de relativité galiléenne comme le fait la matière. Cela a été prouvé par les expériences des Américains Albert Michelson et Edward Morley en 1887 : sa vitesse, notée  $c$ , est toujours la même, qu'on la mesure depuis un repère en mouvement ou immobile, contrairement au cas du boulet de canon dans l'expérience imaginée par Galilée. Lorentz accepte donc le principe étonnant de la constance de  $c$ . Du coup, la loi de composition des vitesses de Galilée, pendant mathématique de son principe de relativité, ne s'applique pas correctement à la lumière et donc aux équations de Maxwell. Pour décrire un même phénomène électromagnétique à partir de deux repères en mouvement relatif à la vitesse  $v$ , la loi doit être modifiée d'un facteur  $\sqrt{1-v^2/c^2}$ . Ce facteur de correction, montre Lorentz, s'applique aux paramètres de temps et de distance de chaque repère en mouvement, comme si ceux-ci « décrochaient » par rapport au temps et à l'espace absolus de Newton, le seul considéré comme vrai. Newtonien dans l'âme, Lorentz considère ces effets comme étant purement calculatoires et ne reflétant pas la réalité du monde... Une réalité qu'Einstein, en revanche, acceptera.



Lorentz décrit le comportement individuel des électrons qui, en se déplaçant, génèrent des champs magnétiques.



## POINCARÉ LE CO-INVENTEUR DE LA LA RELATIVITÉ RESTREINTE

HENRI POINCARÉ (1854-1912).

LE MATHÉMATICIEN FRANÇAIS

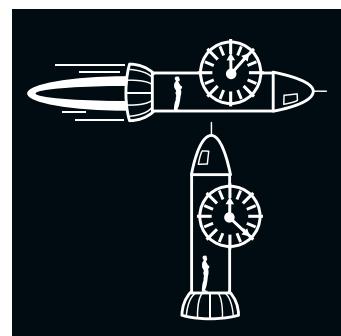
A CONÇU SES PROPRES ÉQUATIONS  
DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE.

Plus encore que Lorentz, Poincaré est extrêmement proche d'Einstein dans sa conception de la relativité des mouvements. Si proche qu'aujourd'hui, on se demande s'il ne serait pas plus juste de parler de la théorie d'Einstein-Poincaré à propos de la relativité restreinte. Car les deux génies ont construit indépendamment les mêmes équations, bien que par des chemins de pensée très dissemblables et dans des cadres mathématiques distincts. Et le Français et l'Allemand les ont publiées à quelques jours d'intervalle : le 5 juin 1905, Poincaré adresse une note intitulée *Sur la dynamique de l'électron* aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, donnant un aperçu de l'article éponyme qu'il n'achèvera et ne communiquera que le 23 juillet. Entre-temps, le 30 juin, Einstein adresse son célèbre *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* aux *Annalen der Physik*... Un entrecroisement de dates qui ne pouvait que conduire à un débat sur les questions d'antériorité scientifique.

Aujourd'hui, un consensus semble s'installer chez les historiens des sciences. D'une part, il y aurait toutes les raisons de dire que les équations de la relativité restreinte sont celles d'Einstein-Poincaré, les deux savants

les ayant découvertes simultanément. Poincaré, mathématicien de génie, présente ces équations sous une forme particulièrement synthétique, utilisant la théorie des groupes, très abstraite, pour exprimer les relations entre les diverses grandeurs physiques. Les équations d'Einstein sont, elles, plus dans la tradition de la physique et moins synthétiques. Ainsi, aujourd'hui, le « groupe des transformations de Lorentz », signature de Poincaré, est l'expression consacrée pour discuter les aspects techniques de la relativité restreinte. En revanche, selon les spécialistes, l'interprétation physique des équations la plus satisfaisante est, de loin, celle d'Einstein.

Il demeure que l'incroyable collision de dates entre leurs publications est un fait inédit ou presque. Mais on sait que la coïncidence a été favorisée par l'influence considérable de Poincaré sur la pensée d'Einstein : les lettres et autres sources montrent un jeune Einstein passionné par les écrits de Poincaré, en particulier *La Science et l'Hypothèse*, publiée en 1902. Ce livre contient une critique pointue du concept d'éther et une analyse du problème de la relativité des mouvements posé par la lumière et les ondes électromagnétiques. On sait qu'Einstein en a été marqué.



Poincaré est le premier à déclarer que la mesure du temps peut être différente d'un observateur à un autre. Mais selon lui, ce décalage est dû au comportement des signaux électromagnétiques. Il ne conclut pas, comme Einstein le fera, à la relativité du temps.

Poincaré est en effet le premier à considérer, dès 1900, que le concept d'un éther support des ondes électromagnétiques est inutile aux physiciens et voué à disparaître des théories. Il est le premier aussi à tirer des équations de Lorentz la conclusion que la mesure du temps et de l'espace peut être altérée d'un observateur à un autre (dilatation du temps, contraction des longueurs) – Lorentz, lui, n'y voit qu'un artifice calculatoire. Le premier encore à anticiper une « nouvelle mécanique » dans laquelle rien ne pourrait dépasser la vitesse de la lumière. Mais l'aspect physique de sa théorie de 1905 demeure classique (newtonienne).

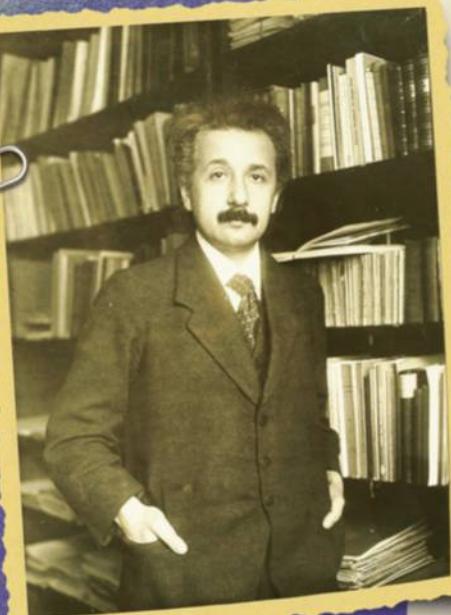
Par exemple, le temps et l'espace absolu sont présents, les autres temps et espaces, ceux d'observateurs en mouvement par rapport à l'espace absolu, sont « apparents ». Pour lui, le décalage temporel entre repères en mouvement relatif touche les signaux électromagnétiques échangés entre les observateurs pour synchroniser les horloges à des fins de mesure, mais il ne s'agit en aucun cas d'un effet touchant le temps des observateurs eux-mêmes. La contraction des longueurs est également un effet de mesure qui n'a rien de réel.

Einstein au contraire, dans son article de 1905, admet totalement la réalité physique et irréductible de la relativité du temps et de l'espace. Et l'éther immobile, qui demeure chez Poincaré comme une convention liée à l'espace absolu, y est totalement absent. Par-là, Einstein casse définitivement le cadre de la physique de Newton, et ouvre la possibilité d'approfondir l'étude de ces nouveaux concepts d'espace et de temps. Ce qu'il fera en 1915, avec sa théorie de la relativité générale.

Alors que les deux savants ont abouti à des résultats similaires, Henri Poincaré (assis à côté de Marie Curie, à d.) et Albert Einstein (debout, à d.) ne se sont rencontrés pour la première fois qu'en 1911, au Congrès Solvay, à Bruxelles.



Ce dossier, ainsi que celui sur les contemporains d'Einstein (p. 68), a été réalisé grâce à la précieuse collaboration de : Olivier Darrigol, physicien et historien des sciences, spécialiste de la relativité, directeur de recherche CNRS/Université Paris-Diderot; Marc Lachièze-Rey, astrophysicien, théoricien et cosmologue, auteur de Einstein à la plage (Dunod, 2015) et chercheur au laboratoire AstroParticule et Cosmologie (APC) de l'université Paris-Diderot; Jean-Jacques Szczeciniarz, philosophe, mathématicien et historien des sciences, directeur du master Histoire et Philosophie des sciences de l'université Paris-Diderot, LOPHISS.



(23)

$$A_{\mu\nu\tau} - A_{\mu\nu\tau} \circ B_{\mu\nu\tau}^{\epsilon} A_{\epsilon} \quad \dots \dots \dots \quad (92)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{\mu\nu\tau}^S &= -\frac{2}{\omega_r} \left\{ \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\}_r + \frac{2}{\omega_b} \left\{ \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\}_b \\ &\quad + \left\{ \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\}_r \left\{ \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\}_b + \left\{ \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\}_b \left\{ \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\}_r \end{aligned} \right\} \dots \quad (43)$$

Wesentliches ist an diesem Resultat, dass auf der rechten Seite von (2) nur das Ag aber nicht mehr das Abilitäten aufstellen muss denn Univerbiabilität von  $\varphi$ -Ag ist die Verbindung damit, dass Ag ein frei ausdrückbares Subjektivum ist, folgt nunmehr die Resultate des S<sub>2</sub>, dass B<sub>2</sub>55 ein Tonus ist (Riemann-Christoffel'scher Tonus).

Die mathematische Bedeutung dieses Tensors liegt in folgendem: Wenn ein ~~bestimmtes~~<sup>(derzeit ungenau beschafft ist)</sup> Koordinatensystem gilt, bezüglich dessen die  $\gamma_{\mu\nu}$  konstant sind, so verschwindet der  $R_{\mu\nu}$ . Wählt man statt des ursprünglichen Koordinatensystems ein beliebiges neues, so werden die  $\gamma_{\mu\nu}$  in allgemeinen ~~bestimmt~~<sup>(derzeit ungenau beschafft ist)</sup> sein. Da tensorcharakter von  $R_{\mu\nu}$  auf es übertragen ist, dass diese Komponenten auch in dem beliebig gewählten Bezugssystem strenglich verschwinden. Das Vorsehen des Ricci-Tensors setzt also eine notwendige Bedingung dafür, dass ~~bestimmt~~<sup>(derzeit ungenau beschafft ist)</sup> die Wahl des Bezugssystems die konstante Konstante  $\gamma_{\mu\nu}$  zur Hälfte erfüllen kann. Ein anderes Problem entspricht diesem Falle, dass  $\omega$  passender  $\omega$  des Roodinatensystems in euklidischen Gebieten der Relativitätstheorie gilt.

Ende beginnend von (73) beginnend der Ziffern 7 und 8 abt-  
der Konkavität liegen zwischen Rängen

$$\left. \begin{aligned} B_{\mu\nu} &= B_{\mu\nu} + J_{\mu\nu} \\ B_{\mu\nu} &= -\frac{2}{x_4} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \{ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \} \\ J_{\mu\nu} &= \frac{2x_1}{x_4^2} \frac{2x_2}{x_3 x_5} - \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{2x_2}{x_4} \end{aligned} \right\} \dots (44)$$

Bemerkung über die Koordinatenwahl. Es ist schon in § 8 im Anschluss an Gleichung (1a) bemerkt worden, dass die Koordinatenwahl nicht mit Einführung von  $\theta_1$  und  $\theta_2$  verbunden ist. Es steht auf das, was den geöffneten Raum betrifft, dass  $\theta_1 = \pi$  wird. Es steht auf das, was den schiefen Winkel  $\theta_2$  betrifft, dass diese wir solches Winkel  $\theta_2$  keinen Einfluss haben können, dass seine Bedeutung ausschließlich ist.

\* Der Mathematiker hat nur bewiesen, dass diese Flügelformung nicht eine  
heimliche ist.

Albert Einstein Archiv

Start der 1. Reihe bildet einen unregelmäßigen Kreis

▲ C'est à Berlin, durant l'été 1915, qu'Einstein parvient à traduire une partie de ses intuitions physiques sous forme mathématique.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} u^2 = -2 \int_{\Omega} u_t u$$

$$\sum_{m=1}^M \frac{2\mu_{1m}}{\lambda_1} \frac{2g_m}{\lambda_2}$$

~~++ Pn Pn Pn~~  
~~Pn + Pn Pn~~  
~~Pn Pn + Pn Pn~~  
~~++ Pn Pn Pn~~

*Juillet 1915 - novembre 1915*

# La genèse d'une théorie révolutionnaire

Le 25 novembre 1915,  
Einstein présente la  
relativité générale. Il ne lui  
a fallu que quelques mois  
pour mettre en équations  
une théorie qui transforme  
l'espace en un univers  
courbe à 4 dimensions !  
Retour sur un formidable  
exploit scientifique.

PAR EMMANUEL MONNIER

« J'

*ai vécu ce dernier mois l'un des moments les plus excitants, les plus épuisants de ma vie* », écrit Albert Einstein à son ami le physicien

Arnold Sommerfeld. Et des plus gratifiants aussi, reconnaît-il ce 28 novembre 1915. En trois semaines, il vient de publier quatre articles majeurs, qui donnent la touche finale au grand œuvre de sa vie : une théorie révolutionnaire de la gravitation ! Les équations ultimes ont été livrées il y a trois jours à peine, le 25 novembre. Et Einstein avoue être, depuis, dans un état extatique. Personne, en deux cents ans, n'avait osé s'attaquer aussi frontalement aux principes édictés au début du XVIII<sup>e</sup> siècle par Isaac Newton. Mais l'ancien employé du Bureau des brevets de Berne n'en est plus à une révolution près...

Dix ans plus tôt, il avait montré la nature corpusculaire de la lumière – que l'on pouvait décrire, selon lui, comme un jet de photons – quand tous les physiciens la considéraient comme une onde. Il avait, surtout, chamboulé la vision que l'on pouvait avoir



En 1914, Einstein est nommé directeur de l'institut Kaiser-Wilhelm (à g.) et professeur à l'université de Berlin (ci-dessous). Mais rien ne va plus dans son couple, et sa femme repart à Zurich avec leurs deux fils. C'est donc dans un contexte familial difficile que le savant va formaliser sa théorie.



de l'espace et du temps, en partant de deux principes simples. Premièrement, toutes les lois de la physique sont les mêmes dans tous les systèmes de mesure en mouvement rectiligne uniforme (une propriété du mouvement déjà remarquée par Galilée et érigée en « principe de relativité » par Henri Poincaré). Deuxièmement, il existe une vitesse limite – celle de la lumière – indépassable, toujours identique à elle-même quel que soit le référentiel de mesure en mouvement rectiligne uniforme utilisé.

Deux principes qui aboutissent à des résultats ébouriffants : les longueurs sont mesurées plus courtes quand la règle se déplace, une horloge bat les secondes plus lentement quand sa vitesse augmente (voir p. 50)... L'espace et le temps perdent leur caractère absolu pour devenir un espace-temps

creux de ses journées pour peaufiner sa théorie. Et, en novembre 1907, il a ce qu'il appellera plus tard « *l'idée la plus heureuse de [sa] vie* » : une personne en chute libre ne sent plus son poids. « *Cette pensée d'apparence si simple me fit une grande impression* », écrira-t-il. Car si, en chute libre, toute sensation de poids disparaît, c'est pour une raison mystérieuse qui avait fini par être acceptée sans

## ***En novembre 1907, Einstein a l'idée la plus heureuse de sa vie : une personne en chute libre ne sent plus son poids***

propre à chaque objet. De quoi choquer le sens commun, bien que l'impact sur la physique des laboratoires soit resté, dans les années qui ont suivi, quasi nul, peu d'objets connus approchant alors des vitesses suffisantes pour que ces effets d'espace-temps puissent être observés.

Peu importe... Einstein, employé à l'époque au Bureau des brevets de Berne, profite des moments

discussion par les physiciens : dans la théorie de la gravitation de Newton, la masse d'un corps, qui définit l'intensité de la force qui va le tirer vers sol (son poids), est strictement proportionnelle à son inertie, c'est-à-dire à sa résistance au mouvement. Un objet deux fois plus lourd est donc deux fois plus attiré vers le sol, mais il résiste deux fois plus au mouvement. Résultat : dans le vide, tous les corps

# De la formule de Newton à celle d'Einstein

Au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, Newton établissait la loi d'attraction universelle :

$$F = G \frac{m_A m_B}{r^2}$$

où  $G$  est la constante de gravitation.

Elle montre que deux corps  $A$  et  $B$  séparés d'une distance  $r$  s'attirent mutuellement selon la force  $F$ . Une formule simple et efficace, mais qui n'explique pas la nature profonde de cette action instantanée à distance qu'est la gravitation.

Il en va tout autrement avec la formule d'Einstein, insaisissable au premier regard :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

Elle signifie que le corps  $A$  déforme l'espace-temps autour de lui et que c'est cette déformation de la géométrie qui crée la "chute" de la masse  $B$ . La partie gauche de l'équation,  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R$ , représente la courbure de l'espace-temps. C'est l'équivalent du " $F$ " de la formule de Newton. Le terme  $T_{\mu\nu}$  à droite est l'analogie des masses  $m_A$  et  $m_B$  dans la formule de Newton, mais sous une forme beaucoup plus compliquée, car comme Einstein l'a montré avec sa formule  $E=mc^2$ , masse et énergie sont liées.  $T$  rassemble

donc la masse et toutes les autres formes d'énergie. Les indices  $\mu$  et  $\nu$  indiquent que  $R$ ,  $g$  et  $T$  ne sont pas des grandeurs simples, mais des tenseurs. En effet, l'espace-temps a 4 dimensions (3 d'espace et 1 de temps). L'équation d'Einstein doit donc donner la déformation de l'espace-temps dans toutes les combinaisons possibles de ces différentes dimensions. Les lettres  $\mu$  et  $\nu$  sont donc des labels qui peuvent prendre chacun les valeurs 0 (pour le temps), 1, 2 ou 3 (pour les 3 dimensions d'espace).

chutent strictement à la même vitesse. Cette équivalence entre masse pesante et inertie est-elle un accident ou a-t-elle un sens plus profond ?

## LA GRAVITATION EST UNE ACCÉLÉRATION

Einstein creuse son idée. Une personne enfermée dans un ascenseur en chute libre aura l'impression que la gravité n'existe plus. Inversement, le physicien imagine une personne enfermée dans une cabine située dans une région de l'espace où n'existe aucun corps massif et donc aucun champ gravitationnel. Si une fusée accélère à son insu, avec une force constante, la cabine vers le « haut », alors la personne de même que tous les objets dans la cabine sont plaqués vers le sol, comme s'ils étaient soumis à une force gravitationnelle. L'accélération de la cabine a ainsi les mêmes effets qu'un champ gravitationnel. Einstein en déduit tout de suite un premier effet expérimental : un rayon lumineux dans un champ gravitationnel se comporte

comme s'il était vu d'une cabine en chute libre : sa trajectoire se courbe. Le principe « de relativité », qui postule que les lois de la physique s'expriment avec des lois équivalentes dans tous les repères en mouvement rectiligne uniforme, s'accompagne donc d'un nouveau principe d'équivalence, entre accélération et gravitation.

L'idée est prometteuse, mais Einstein consacre alors son énergie à d'autres problèmes physiques. Avec Max Planck et d'autres scientifiques de renom, il va construire les bases d'une physique atomique révolutionnaire, dans laquelle l'énergie n'est plus continue, mais s'exprime sous forme de grains discrets : les quanta. Par ailleurs, ses conditions de travail s'améliorent, puisqu'il accepte un poste de professeur à l'université de Zurich en 1909, puis à Prague, en 1911, avant de revenir à Zurich en 1912 comme professeur au Polytechnicum, l'école où il fut lui-même étudiant. C'est là, qu'au mois d'août 1912, il a une nouvelle intuition : la présence

➤ Le 19 novembre 1915, David Hilbert, le plus grand mathématicien de l'époque, félicite Einstein d'avoir réussi, avec ses calculs, à expliquer l'anomalie observée dans l'orbite de Mercure depuis soixante ans.



d'une masse crée un mouvement accéléré, mais on peut interpréter cette accélération comme un mouvement rectiligne uniforme dans un espace-temps déformé (la vitesse reste constante, mais la mesure des longueurs raccourcit). Un champ gravitationnel, équivalent à une accélération, équivaut donc à une déformation de la géométrie de l'espace-temps.

Voilà pour l'intuition. Reste à la formuler de façon mathématique... Un cauchemar pour Einstein qui n'a jamais vraiment aimé les maths ! Il postule que les lois de la physique doivent être les mêmes quel que soit le référentiel utilisé, même s'il est en accélération ou en rotation. Un postulat qu'il appelle « principe de relativité générale », car il généralise celui posé en 1905. Il lui faut maintenant définir la chronogéométrie d'un espace-temps déformé, c'est-à-dire l'expression d'une distance élémentaire dans cet espace-temps, qui n'est plus donnée par la formule classique de Pythagore, mais, en chaque point, par un objet mathématique nouveau,

Liebe Herr Professor  
Viele Dank für die Skizze und Ihren Aufsatz über das Problem der Relativitätstheorie. Wenn ich nur von Zeit zu Zeit einen kleinen Beitrag zum Thema entgegenstellen darf, dann kann ich mich entsprechend den Gedanken des Autors aufstellen und zu dem Sinn des Wasserschiffes sei ich ebenfalls ganz gesetzmäßig, wenn es um die Straße geht, sehr froh darüber, dass es Ihnen gelungen ist, diese Arbeit fertig zu bringen. Ich schreibe Ihnen noch ein paar Worte, wenn Sie mich erlauben. Ich bin mit den besten Grüßen Ihr David Hilbert

mettra du temps à être à l'aise avec ce nouveau formalisme. Son tenseur métrique compte 10 coefficients. Il serait égal, d'après son intuition de 1907, au champ gravitationnel. Et sa variation en chaque point créerait l'accélération de l'objet.

Mais, physiquement, qu'est-ce qui crée le champ gravitationnel ? Chez Newton, c'est la masse de l'objet. Sauf qu'Einstein a montré, avec la fameuse équation  $E = mc^2$  de la relativité restreinte, que masse et énergie sont dans une certaine mesure synonymes. La source de la gravitation est donc la masse-

## Au mois d'août 1912, il a une nouvelle intuition : un champ gravitationnel équivaut à une déformation de l'espace-temps

appelé « tenseur métrique ». Or ces objets ne sont simples ni à comprendre ni à manipuler. Ils se présentent sous forme de tableaux de nombres, qui généralisent à  $n$  dimensions la notion de vecteurs de l'algèbre linéaire et permettent d'exprimer des grandeurs en faisant abstraction d'un repère précis. Un tenseur associe à un ensemble de vecteurs et de covecteurs un nombre, de façon linéaire. Einstein

énergie. Einstein comprend qu'il doit construire un objet mathématique encore un peu plus complexe : le tenseur  $T$  d'énergie, d'impulsion et des tensions, qui comprend lui aussi, comme le tenseur métrique, 10 coefficients. L'équation fondamentale de la gravitation relativiste doit alors avoir la forme d'une loi d'élasticité de l'espace-temps, c'est-à-dire, sous une forme simplifiée,  $D = kT$ , où  $D$  est le tenseur

Lieber Sommerfeld!

Es drängt mich wohl hör' sein, dass du  
erst heute auf Thress freundlicher und  
interessanter Brief antwortest.  
Ich habe im letzten Monat eine lange  
Fragesteller, entgegengesetzte  
meines Leidens, allerdings auch die  
reichtzen. Aus Salzburg kommt  
denken.

dekkens.  
 Tote erkennbare mindestens drei  
 Sicherungen teileig. Carl von der  
 Jagdfeinde hattlos waren. Auf die  
 folgenden Aufenthaltsgegenstände  
 1) Tote bewies, dass dies Granitplatte  
 auf einem gleichfarbigen schiefen  
 den teileig. Sicherungen nicht,  
 2) Die Bewegung des Werkzeuges  
 sieht  $15^{\circ}$  statt  $45^{\circ}$  pro Zahn  
 3) Die Konvergenz bei der Arbeitung  
 bestätigt vom letzten Tote  
 (Kettensäge H) nicht. Sie bestätigt  
 genauso verallgemeinert wurde  
 H. Von diesem ergibt sich, dass die

**> Le 28 novembre, Einstein s'excuse auprès de son ami Sommerfeld de ne pas lui avoir écrit plus tôt: il était occupé à... corriger ses équations! Einstein est éprouvé et exalté: il a présenté, trois jours plus tôt, la version finale de sa théorie.**

métrique censé mesurer la déformation de l'espace-temps et  $k$ , une constante. Mais quelle forme mathématique précise ce tenseur prend-il ?

## LE TOURNENT DES MATHÉMATIQUES

Einstein appelle à la rescoussse son vieil ami le mathématicien hongrois Marcel Grossmann, qu'il a connu alors qu'ils étaient tous deux étudiants au Polytechnicum. Ce dernier l'aiguille vers les travaux des Allemands Bernhard Riemann et Elwin Bruno Christoffel, et des Italiens Gregorio Ricci-Curbastro et Tullio Levi-Civita. Mais il faudra de longs mois à Einstein pour les assimiler. « Jamais je n'avais été autant tourmenté par un problème. J'ai acquis un grand respect pour les mathématiques, alors qu'auparavant j'avais tendance à considérer les techniques mathématiques sophistiquées comme un luxe inutile ! En comparaison avec le problème actuel, la théorie de la relativité restreinte était un jeu d'enfants », confie-t-il à Arnold Sommerfeld.

En 1914, il est nommé directeur de recherche à l'Académie prussienne des sciences, à Berlin. Mais rien ne va plus entre sa femme Mileva et lui. Le couple

Es ist unbestimmt, was allgemein korrespondierende Schwingungen hängen, schreibt aber, insbesondere, dass sie Vierdimensionen von Potenzialen übertragen, und nicht leicht auszurechnen, obgleich genügend  
 ganze Theorie der man das  
 zu klären trifft.  
 Schwingungen des  
 Restsystems und Methode der freien  
 Theorie zwischen mir, sag ich klar, dass  
 man durch einen Bruchschluss an die  
 allgemeine Korrespondenztheorie, d. h.  
 an Riemanns Korrespondenz, wie beispiel-  
 sige Lösungen auf der werden kommt.  
 Die letzteren bestimmen in diesem Range  
 habe ich leider in den Abendnächten, abgesehen  
 die sehr kleinen bald wieder heraus, ver-  
 sagt. Das endgültige Ergebnis ist folgendes,  
 die Schwingungen des Gravitationsfeldes  
 sind allgemein konserviert. Setzt  
 (ck, lm)  
 der Charakteristikkreis linear reellen Range, so  
 ist  $G_{lm} = \sum_k q^{(k)} c_k(lm)$   
 ein symmetrischer linear reeller Range.  
 Die Gleichungen lauten  

$$G_{lm} = -K \left( T_{lm} - \frac{1}{2} g_{lm} \beta_{lm} \right)$$

$$G_{im} = -\kappa \left( T_{im} - \frac{1}{2} g_{im} \partial_j \partial_k \eta_{jk} \right)$$

<sup>10</sup>  
Steckes 120  
"verglichenen der  
"Matrize," für die  
sie in folgender Tabelle

zweite Theorie  
dass man das  
zu dass  $t_f = 1$   
eigentliche  
 $\Delta t_f = 0$   
 $\Delta t_f = -k \left( T_m - \frac{1}{2} \text{ min} \right)$   
ist sehr oft falsch  
und das ist das  
erste, was daran  
zeigt, dass sie nicht  
fertig, was unterschreibt  
in Formung befindet  
lass nicht

man den Winkel zwischen  
natürlichen Ausdruck  
in "des Gravitationsfeldes"  
man das gestern, so ist

more rabbits  
than  
once. Rabbits send down all  
that.

se sépare. Mileva quitte Berlin et se réinstalle à Zurich avec leurs deux fils. C'est donc dans une garçonnière de célibataire, dans le tumulte d'une séparation douloureuse, que les intuitions physiques d'Einstein commencent, durant l'été 1915, à prendre enfin une forme mathématique. Il résume ses idées lors d'un séminaire à l'université de Göttingen, auquel assiste le plus grand mathématicien de l'époque : l'Allemand David Hilbert. La rencontre entre les deux génies fait des étincelles. Emballé par les idées révolutionnaires d'Einstein, Hilbert relève le défi de les mettre en équations. Les deux scientifiques sont complémentaires : Einstein a une compréhension intime des principes physiques qu'il a découverts, mais Hilbert maîtrise bien mieux leur formulation mathématique. Une correspondance passionnée s'établit entre eux.

Einstein reconnaît, dans une première conférence donnée le 4 novembre à l'Académie de Berlin, que ses équations sont bancales : elles n'ont pas de covariance générale, c'est-à-dire qu'elles ne donnent pas une expression équivalente lors d'un changement de repère, alors que le physicien est convaincu que les équations gravitationnelles doivent être



Observée en mai 1919 par l'astronome Arthur Eddington, une éclipse solaire valide la théorie d'Einstein et propulse le savant au rang de star mondiale.

invariantes quel que soit le changement de référentiel que l'on opère. Lors d'une seconde conférence, le 11 novembre, il livre les conditions qui permettraient de les rendre covariantes. Or Hilbert, de son côté, semble également près du but. Il essaie même de voir plus loin qu'Einstein, de fournir non pas une simple théorie de la gravitation, mais une théorie axiomatique globale du monde qui engloberait toute la physique, de la gravitation à l'électromagnétisme.

#### UNE DÉVIATION DE LA LUMIÈRE

L'émulation entre les deux hommes tourne à la compétition, tant les enjeux scientifiques sont immenses. Quelques jours plus tard, Einstein corrige ses équations et calcule l'écart approximatif qu'elles induisent sur l'orbite d'une planète par rapport aux équations de Newton. Heureuse surprise : cet écart

Sa théorie décrit-elle mieux le réel que celle de Newton qu'elle prétend remplacer ? La déviation des rayons lumineux de différentes étoiles au voisinage du Soleil, mesurée lors de l'éclipse du 29 mai 1919, le confirmera, et le triomphe d'Einstein sera alors total. À ce jour, la relativité d'Einstein est l'une des théories physiques les plus solidement établies, aucun résultat expérimental n'entrant en contradiction avec elle. Einstein a néanmoins toujours eu conscience qu'elle n'était pas la théorie ultime. Après avoir associé l'espace et le temps dans l'espace-temps, la masse et l'énergie, puis l'espace-temps et la gravitation, il rêvera, jusqu'à la fin de sa vie, de pousser encore plus loin cette grande unification en regroupant gravitation et électromagnétisme, ce que réalise aujourd'hui la théorie des cordes, qui bute néanmoins sur cette identité

## *Le 25 novembre, lors d'une conférence, Einstein livre enfin les équations covariantes du champ de la relativité générale*

explique parfaitement l'anomalie de 43 secondes d'arc par siècle observée dans l'orbite de Mercure depuis plus de soixante ans. Einstein, qui annonce ce résultat exceptionnel lors d'une troisième conférence, en ressent des palpitations cardiaques. « Jusqu'à aujourd'hui, aucune théorie de la gravitation n'avait réussi à l'expliquer », écrit-il, ravi, à Hilbert. Après un ultime effort, il livre enfin, lors d'une dernière conférence, le 25 novembre, les équations covariantes du champ de la relativité générale.

toujours plus profonde entre le contenant, l'espace-temps, et le contenu, la matière et l'énergie.

Faut-il aller encore plus loin qu'Einstein et postuler que l'espace-temps, qui structure toute notre perception du monde, n'est qu'une illusion ? En 1954, un an avant sa mort, Einstein émettra l'hypothèse d'une théorie ne contenant ni espace ni temps. « Mais personne ne sait la construire », regrettera-t-il. À moins que n'émerge, bientôt, un nouvel Einstein encore plus révolutionnaire ?

# NOUVEAU!

# BEETHOVEN

Concertos / Ouvertures / Fidelio / Messes

## Volume V

Coffret 13 CD

Plus de 16 h d'écoute !

Un livret de 36 pages

Edition Collector

## LA DISCOTHÈQUE IDÉALE DE DIAPASON

### DES VERSIONS DE LEGÉNDE

sélectionnées par les critiques de Diapason et les plus grands interprètes d'aujourd'hui :

Gidon Kremer, Isabelle Faust, Jean-Guihen Queyras, Alfred Brendel, Benjamin Grosvenor,

François-Frédéric Guy, Jonathan Biss, Bertrand Chamayou, Paul Badura-Skoda



Coffret  
**13 CD**  
+ Livret 36 pages

24,90

DÉJÀ PARUS



en partenariat avec



À commander sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com)

Également disponible en magasin, sur les sites de vente par correspondance et les plateformes de téléchargement.



*Origines, principes, conséquences...*

# TOU COM LA RE

# PRENDRE À, LATIVITÉ

Des durées qui se dilatent, des longueurs qui se contractent, l'Univers qui devient courbe et le temps, relatif... la théorie d'Einstein n'a rien d'intuitif ! Mais grâce à quelques expériences de pensée, imaginées pour certaines par Einstein lui-même, à bord d'un avion, d'un train, d'une fusée et d'un ascenseur, elle devient carrément logique. Démonstration.



# ***LA RELATIVITÉ RESTREINTE***

## ***Une nouvelle théorie adaptée à la lumière***

À la fin du xix<sup>e</sup> siècle, les physiciens savent que la lumière est une onde. Or, le bon sens veut qu'une onde ait besoin, pour se propager, d'un milieu matériel : les vagues avancent à la surface de l'eau et les sons se diffusent dans l'air. Pourtant, la lumière semble capable de se mouvoir dans le vide (un objet placé sous une cloche transparente dans laquelle on fait le vide est toujours visible, preuve que la lumière arrive bien jusqu'à lui, s'y reflète et revient vers notre œil) ! Mais cette idée est inacceptable à l'époque. D'où l'hypothèse

qu'une substance imperceptible occupe vraisemblablement l'espace dans ses moindres recoins et sert de support à la propagation de la lumière. Un fluide que l'on baptise « éther ».

En 1887, les physiciens américains Albert Michelson et Edward Morley cherchent à prouver expérimentalement l'existence de cette mystérieuse substance. Le cadre de leur expérience ? Tout simplement la Terre, qui comme tous les objets de l'Univers, baigne dans l'éther. Car notre planète, dans son mouvement d'orbite

AU XIX<sup>e</sup> SIÈCLE,  
LES PHYSICIENS  
PENSAIENT  
QUE LA LUMIÈRE  
SE DÉPLAÇAIT  
DANS L'ÉTHER  
ET QUE SA VITESSE  
POUVAIT VARIER  
SELON SA DIRECTION.  
UNE IDÉE QUE VA  
RÉCUSER EINSTEIN.

Mouvement de la  
Terre autour du Soleil

Vent d'éther créé  
par le déplacement  
de la Terre

tout autour du Soleil à la vitesse respectable de 29 km/s, devrait voir apparaître à sa surface un « vent d'éther ». Et ce vent devrait favoriser la propagation de la lumière dans une direction particulière ! Michelson et Morley conçoivent donc, sur une table tournante, un dispositif émettant deux rayons lumineux dans des directions perpendiculaires (dont un émis parallèlement au mouvement de la Terre), puis les renvoyant, grâce à un jeu de miroirs, vers leur point de départ, après qu'ils ont parcouru des distances identiques.

Selon la loi d'addition des vitesses établie par Galilée, les chercheurs devraient déceler une variation de la vitesse de la lumière selon ces deux directions. Pourtant, après plusieurs mesures, les chercheurs constatent que la vitesse de la lumière est toujours identique : 299 792 km/s, quelle que soit sa direction ! Un résultat incompréhensible... Car à l'époque, aucun physicien n'ose remettre en cause l'existence de l'éther ou la sacro-sainte loi d'addition des vitesses. Avec la lumière, la physique est dans une impasse.



## LE PRINCIPE FONDATEUR

# *La vitesse de la lumière est constante*

S'appuyant sur le résultat de l'expérience de Michelson et de Morley, Einstein change de paradigme en établissant la théorie de la relativité restreinte en 1905. Au lieu de considérer que la vitesse de la lumière doit être relative dans un espace et un temps absolus, il va reconstruire la physique en considérant, au contraire, la vitesse de la lumière comme absolue dans un espace et un temps relatifs. C'est l'un des deux principes sur lesquels s'appuie sa théorie : la vitesse de la lumière est toujours égale à  $c$  (299 792 km/s dans le vide), quelle que soit

la vitesse du corps qui émet cette lumière. Qu'un vaisseau soit à l'arrêt ou qu'il soit en mouvement très rapide dans le vide spatial, la vitesse de la lumière émise par ses phares (avant comme arrière) sera toujours la même, égale à 299 792 km/s. L'autre principe que retient Einstein est une propriété du mouvement déjà remarquée par Galilée et érigée en « principe de relativité » par Henri Poincaré. Elle stipule que toutes les lois de la physique sont les mêmes dans n'importe quel « référentiel galiléen », c'est-à-dire dans n'importe quel

## **ALORS QUE POUR LES OBJETS, LES VITESSES S'ADDITIONNENT...**



*PRENONS LE CAS D'UN MISSILE TIRÉ À 20 000 km/h DEPUIS LE SOL D'UNE PLANÈTE.*



*TIRÉ DEPUIS L'AVANT D'UN VAISSEAU LANCÉ À 10 000 km/h, LE MÊME MISSILE ATTEINDRA LA VITESSE DE 30 000 km/h.*

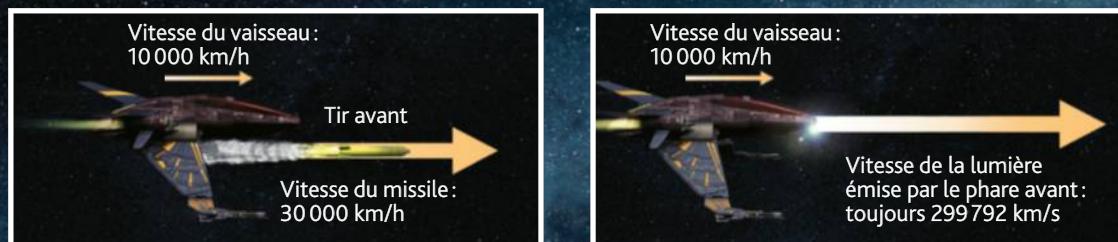


*TIRÉ VERS L'ARRIÈRE DU VAISSEAU, IL N'ATTEINDRA PLUS QUE LA VITESSE DE 10 000 km/h.*

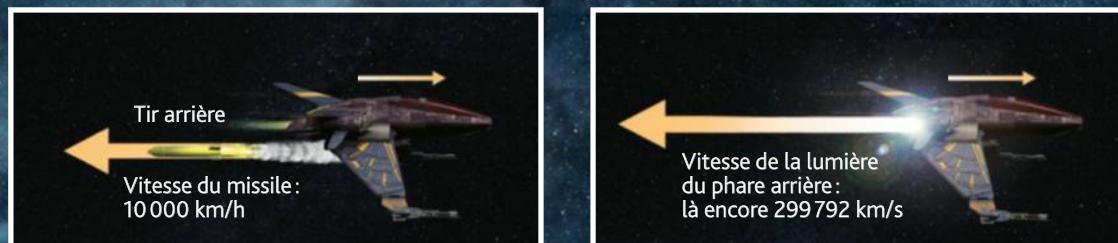
## **... LA VITESSE DE LA LUMIÈRE, ELLE, RESTE CONSTANTE**



*PRENOÑS MAINTENANT UN RAYON DE LUMIÈRE ÉMIS PAR UN ASTRE. IL VOYAGE À LA VITESSE « c », SOIT 299 792 km/s.*



*ÉMIS PAR LE PHARE D'UN VAISSEAU LANCÉ À 10 000 km/h (SOIT 3 km/s), LE RAYON VOYAGE TOUJOURS À 299 792 km/s.*



*QUANT AU RAYON ÉMIS PAR LE PHARE ARRIÈRE DU VAISSEAU, IL VOYAGE LUI AUSSI TOUJOURS À 299 792 km/s.*

réceptacle (un train, un avion, une cabine d'ascenseur...) animé d'un mouvement rectiligne et se déplaçant à vitesse constante. Ce principe signifie qu'à l'intérieur d'un tel véhicule, aucune expérience ne permet de distinguer s'il est en mouvement ou au repos. Autrement dit, le passager d'un train circulant à vitesse constante n'a aucun moyen de savoir si le train avance ou s'il est à l'arrêt (à moins de regarder le paysage extérieur). D'apparence simple, ces deux principes associés sont révolutionnaires : ils impliquent que

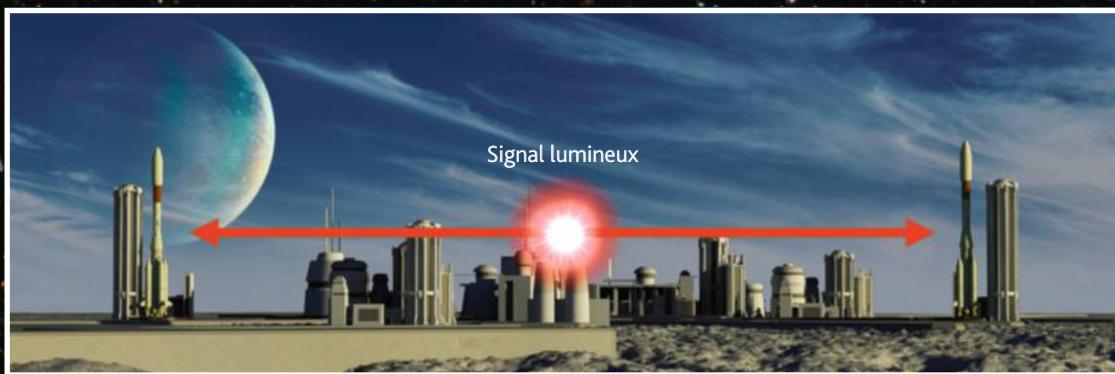
l'espace et le temps sont intrinsèquement liés. Ils deviennent « l'espace-temps ». La vitesse de la lumière apparaît également dans l'équation  $E = mc^2$ , publiée elle aussi en 1905. Elle signifie que tout objet possède une énergie propre ( $E$ ), égale à sa masse ( $m$ ) multipliée par le carré de la vitesse de la lumière ( $c^2$ ). Un objet de 1 kg au repos possède ainsi une énergie interne de  $10^{17}$  joules (plus de 1000 bombes d'Hiroshima !), alors qu'à 20 km/h, son énergie cinétique (donnée par la formule  $E = 1/2 mv^2$ ) ne serait que de 15 joules.

# À des vitesses très élevées, la simultanéité n'est pas universelle

C'est l'une des conséquences décoiffantes de la relativité restreinte: un observateur voyageant à une vitesse « relativiste » (c'est-à-dire proche de celle de la lumière) ne voit pas nécessairement les événements se dérouler dans le même ordre qu'un observateur fixe par rapport à la scène ! Prenons le cas de deux fusées, dont la mise à feu est déclenchée par un flash lumineux émis depuis une tour située à égale distance d'elles deux. Une personne regardant cette scène depuis le sol voit le signal lumineux atteindre simultanément les deux fusées, qui décollent précisément en même

temps. Mais pour un individu qui verrait la scène depuis un vaisseau spatial très rapide, en mouvement rectiligne et constant vers la droite, les choses ne se passent pas ainsi. Car en vertu du principe de relativité des mouvements, cet observateur peut s'estimer immobile et considérer que c'est la station qui bouge vers la gauche. Il voit donc la fusée de droite aller à la rencontre du rayon lumineux, tandis que celle de gauche s'en éloigne. Le signal atteint donc la fusée de droite avant celle de gauche, et les deux fusées décollent successivement. La simultanéité devient donc relative...

**ALORS QUE POUR UN OBSERVATEUR AU SOL,  
LES DEUX DÉCOLLAGES SONT SIMULTANÉS...**



SUR UNE BASE SPATIALE, UN SIGNAL LUMINEUX ÉQUIDISTANT DE DEUX FUSÉES DOIT DÉCLENCHER LEUR DÉPART.



VUS DÉPUIS LA BASE, LES RAYONS LUMINEUX ATTEIGNENT AU MÊME MOMENT LES FUSÉES, QUI DÉCOLLENT SIMULTANÉMENT.

*... POUR UN OBSERVATEUR EN MOUVEMENT RAPIDE,  
ILS SONT SUCCESSIFS*



*DEPUIS SON VAISSEAU SPATIAL VOLANT À TRÈS GRANDE VITESSE VERS LA DROITE, LE PILOTE VOIT LES RAYONS DE LUMIÈRE PARTIR EN MÊME TEMPS.*



*AUX YEUX DU PILOTE, LA BASE DÉFILE VERS LA GAUCHE, AINSI, LA FUSÉE DE DROITE VA À LA RENCONTRE DU FLASH, ALORS QUE CELLE DE GAUCHE LE FUIT. LE SIGNAL LUMINEUX ATTEINT DONC D'ABORD LA FUSÉE DE DROITE.*

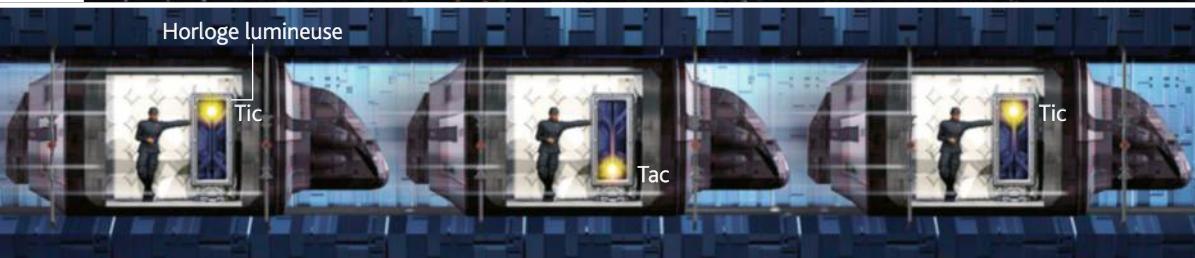


*CE N'EST QU'UN PEU PLUS TARD QUE LE PILOTE VOIT LE SIGNAL LUMINEUX ATTEINDRE LA FUSÉE DE GAUCHE. DE SON POINT DE VUE, LE DÉCOLLAGE DES DEUX FUSÉES N'EST DONC PAS SIMULTANÉ.*

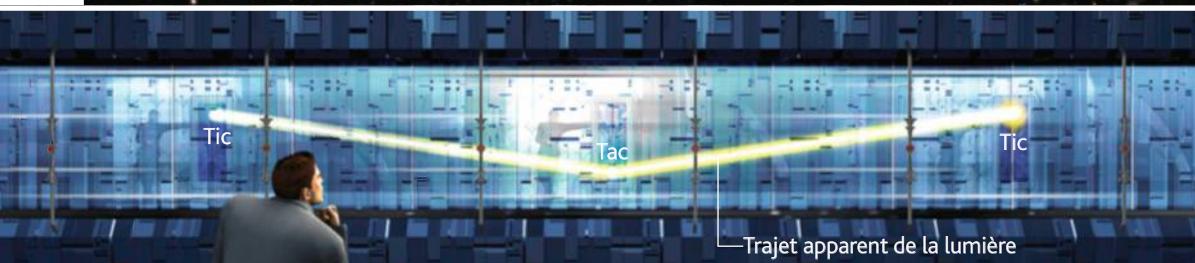
# Les durées se dilatent

En gardant à l'esprit les deux principes de la relativité restreinte (l'impossibilité de distinguer un mouvement rectiligne uniforme du repos, et la constance de la vitesse de la lumière), imaginons un train spatial transparent circulant à une vitesse constante proche de celle de la lumière. Plaçons à son bord une horloge lumineuse (un flash qui rebondit entre deux miroirs). Pour le contrôleur à l'intérieur, tout se passe comme si le train était à l'arrêt (selon le premier principe de la relativité restreinte). Entre deux « tic » sur le miroir supérieur, la lumière parcourt deux fois la hauteur de l'horloge. Mais pour un observateur extérieur qui voit le train se déplacer, la lumière couvre une distance bien plus grande. Or, comment la lumière peut-elle effectuer un chemin plus long, sans circuler plus vite (puisque le second principe établit la constance de la vitesse de la lumière) ? Une seule réponse est possible : c'est qu'elle

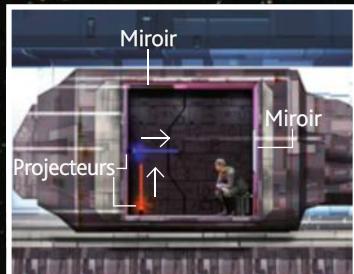
dispose de plus de temps. Du point de vue de l'observateur extérieur, la durée d'un battement d'horloge est donc plus longue que du point de vue du contrôleur à bord du train. Einstein en tire la conclusion suivante : *« Si nous placions un organisme vivant dans une boîte... on pourrait s'arranger pour que cet organisme, après un temps de vol aussi long que voulu, puisse retourner à son endroit d'origine, à peine altéré, tandis que les organismes correspondants, qui sont restés dans leur position initiale, auraient depuis longtemps cédé la place à de nouvelles générations. Car pour l'organisme en mouvement, la grande durée du voyage était un court instant, à condition que le mouvement ait été effectué quasiment à la vitesse de la lumière. »* Cet effet, difficile à accepter, fut baptisé par d'autres « paradoxe des jumeaux », considérant que deux jumeaux se déplaçant à des vitesses différentes ne vieilliraient pas au même rythme.



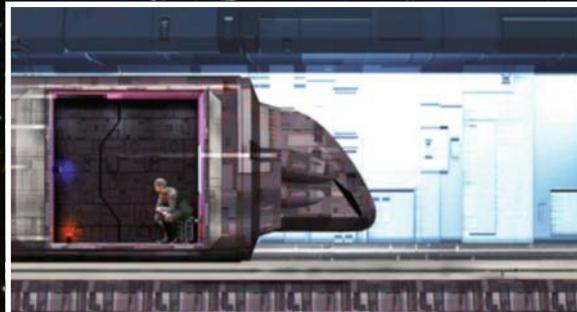
ALORS QUE POUR LE CONTRÔLEUR DU TRAIN LE BATTEMENT DE L'HORLOGE LUMINEUSE A UNE CERTAINE DURÉE...



... POUR L'OBSERVATEUR EXTÉRIEUR, LA LUMIÈRE A PARCOURU UNE DISTANCE PLUS LONGUE DANS LE MÊME TEMPS. COMME LA VITESSE DE LA LUMIÈRE EST CONSTANTE, CELA VEUT DONC DIRE QUE L'HORLOGE BAT PLUS LENTEMENT.



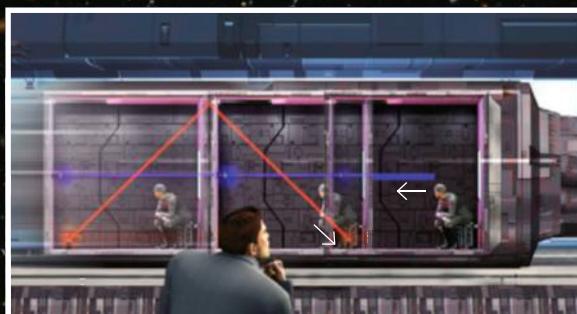
ALORS QUE POUR LE CONTRÔLEUR LES DEUX RAYONS PARCOURSENT EXACTEMENT LA MÊME DISTANCE...



... POUR L'OBSERVATEUR EXTÉRIEUR...



... LES RAYONS NE FRAPPENT PLUS LES MIROIRS EN MÊME TEMPS...



... CAR LE RAYON BLEU DOIT PARCOURIR PLUS DE CHEMIN QUE LE ROUGE.

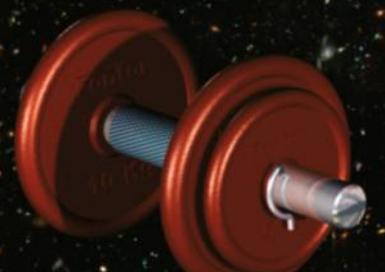
### T R O I S I È M E C O N S É Q U E N C E

## *Les longueurs se contractent*

Retrouvons notre train spatial transparent, l'observateur extérieur et le contrôleur, assis cette fois dans une nouvelle cabine: au sol, un projecteur rouge, au mur, un projecteur bleu, et, face à chaque projecteur, un miroir. Précisons que la cabine forme un carré parfait. Le train file à une vitesse constante rapide, disons 180 000 km/s. Pour le contrôleur, tout se passe comme si le train était immobile. Il voit les rayons lumineux partir, se réfléchir et revenir en même temps à leur point de départ. Pour lui, les dimensions de la cabine carrée sont constantes. Mais pour l'observateur extérieur, les rayons parcourent des distances plus longues pour revenir à leur point de départ. Légèrement plus longue pour le rouge qui part en diagonale (1,4 fois environ sur le dessin ci-contre), et encore un peu plus longue pour le bleu (environ 1,5 fois ici), qui doit « courir » après le miroir opposé. Comme ces trajets ont été parcourus dans le même temps et à la même vitesse, l'observateur en déduit que 1,5 fois la largeur de la cabine égale 1,4 fois sa hauteur. Pour lui, le train s'est donc contracté dans le sens du mouvement!



DANS LE VIDE, TOUS  
LES CORPS CHUTENT À  
LA MÊME VITESSE. UNE  
DONNÉE ACCEPTÉE PAR  
NEWTON ET REMISE EN  
CAUSE PAR EINSTEIN.



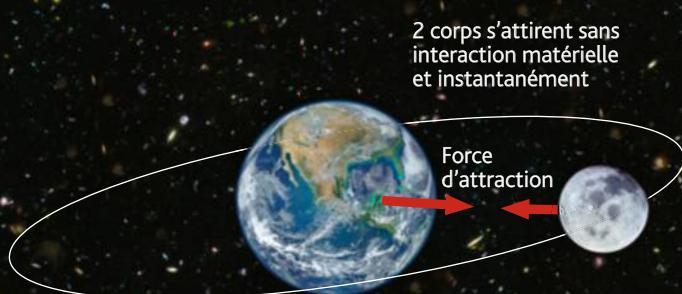
# LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

## Une nouvelle théorie pour la gravitation

Dix ans après avoir formulé la relativité restreinte, Einstein revient sur le devant de la scène avec la théorie de la relativité générale. Cette fois, ce n'est plus la lumière qui est au centre des réflexions du physicien, mais la gravitation. Selon la théorie de la gravitation d'Isaac Newton, en vigueur à l'époque, tous les corps s'attirent les uns les autres : c'est la loi de l'attraction universelle. Cette attraction explique les orbites décrites par des corps célestes autour d'un autre plus massif (la Lune autour de la Terre, les planètes autour du Soleil). Sans elle, ils continueraient leur route en ligne droite dans le cosmos, emportés par leur élan. Elle explique aussi le poids de tous les objets sur Terre. Elle concerne donc tous les corps de l'Univers, excepté la lumière qui, elle, semble voyager en complète liberté. Mais si cette théorie décrit alors parfaitement les observations des astronomes, ses fondements ne satisfont pas Einstein. D'abord parce cette notion de force d'attrac-

tion gravitationnelle reste mystérieuse, pour ne pas dire magique ! Elle s'exerce en effet entre deux corps sans aucun contact ni aucune interaction matérielle, et de façon instantanée. Une aberration pour Einstein. Car qui dit instantané, dit vitesse infinie. Or le physicien allemand a établi que rien ne peut dépasser la vitesse de la lumière. Par ailleurs, Newton est incapable de préciser les bases physiques de cette force qui s'exerce à distance.

Surtout, un autre point s'avère incompréhensible : dans le vide, tous les corps (une plume, un haltère, une pomme...) chutent à la même vitesse accélérée. Jusqu'alors, cette idée, énoncée par Galilée dès le XVII<sup>e</sup> siècle, était acceptée sans discussion. Mais qu'une très grande quantité de matière réagisse comme une infime quantité paraît vraiment très étrange à Einstein... D'où la nécessité, pour le savant allemand, de proposer une nouvelle théorie gravitationnelle qui repose sur des bases plus solides.

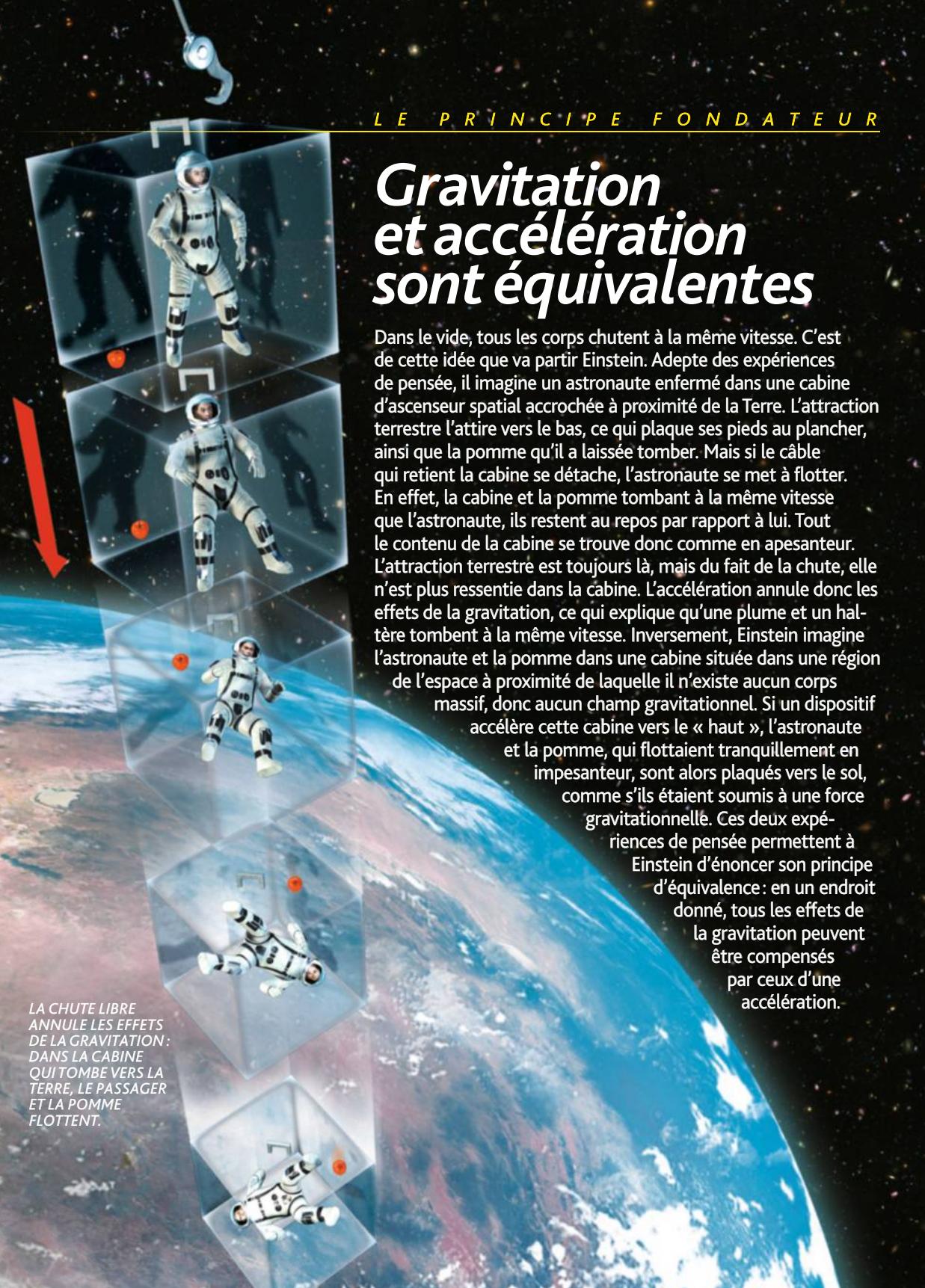


LA FORCE D'ATTRACTION DE NEWTON NE CONVENAIT PAS À EINSTEIN POUR QUI RIEN NE PEUT ÊTRE INSTANTANÉ, PUISQUE RIEN NE PEUT DÉPASSER LA VITESSE DE LA LUMIÈRE.

# Gravitation et accélération sont équivalentes

Dans le vide, tous les corps chutent à la même vitesse. C'est de cette idée que va partir Einstein. Adepte des expériences de pensée, il imagine un astronaute enfermé dans une cabine d'ascenseur spatial accrochée à proximité de la Terre. L'attraction terrestre l'attire vers le bas, ce qui plaque ses pieds au plancher, ainsi que la pomme qu'il a laissée tomber. Mais si le câble qui retient la cabine se détache, l'astronaute se met à flotter. En effet, la cabine et la pomme tombant à la même vitesse que l'astronaute, ils restent au repos par rapport à lui. Tout le contenu de la cabine se trouve donc comme en apesanteur. L'attraction terrestre est toujours là, mais du fait de la chute, elle n'est plus ressentie dans la cabine. L'accélération annule donc les effets de la gravitation, ce qui explique qu'une plume et un haltère tombent à la même vitesse. Inversement, Einstein imagine l'astronaute et la pomme dans une cabine située dans une région de l'espace à proximité de laquelle il n'existe aucun corps massif, donc aucun champ gravitationnel. Si un dispositif accélère cette cabine vers le « haut », l'astronaute et la pomme, qui flottaient tranquillement en impesanteur, sont alors plaqués vers le sol, comme s'ils étaient soumis à une force gravitationnelle. Ces deux expériences de pensée permettent à Einstein d'énoncer son principe d'équivalence : en un endroit donné, tous les effets de la gravitation peuvent être compensés par ceux d'une accélération.

**LA CHUTE LIBRE ANNULE LES EFFETS DE LA GRAVITATION : DANS LA CABINE QUI TOMBÉ VERS LA TERRE, LE PASSAGER ET LA POMME FLOTTENT.**



INVERSEMENT,  
L'ACCÉLÉRATION  
D'UNE CABINE  
EN APESANTEUR  
PLAQUE LE PASSAGER  
ET LA POMME AU SOL,  
COMME LE FERAIT  
LA GRAVITATION.

A diagram illustrating the effect of acceleration on weightlessness in a spacecraft cabin. On the left, the Earth is shown against a star-filled background. To its right, a series of five transparent rectangular boxes represent the cross-sections of a spacecraft cabin. An astronaut is shown in each section. In the first section, the astronaut is floating in zero gravity. A red arrow points upwards from this section towards the top section. In the second section, the astronaut is leaning forward, and a small orange ball is touching the floor of the cabin. In the third section, the astronaut is leaning further forward, and the ball has moved closer to their feet. In the fourth section, the astronaut is leaning almost vertically, and the ball is near the floor. In the fifth section, the astronaut is leaning far forward, and the ball is almost touching the floor. This sequence demonstrates how increasing acceleration (from left to right) causes the passenger and the apple to "press" against the floor of the cabin, just as gravity would do on Earth.



... et ressort par le bas de la paroi droite.

$t_4$

$t_1$   
Le rayon de lumière pénètre dans la fusée en haut à gauche...

ALORS QUE DU POINT DE VUE DE L'OBSERVATEUR IMMOBILE DANS L'ESPACE LE RAYON LUMINEUX DÉCRIT UNE LIGNE DROITE...



P R E M I È R E  
C O N S É Q U E N C E

## L'espace-temps est courbe

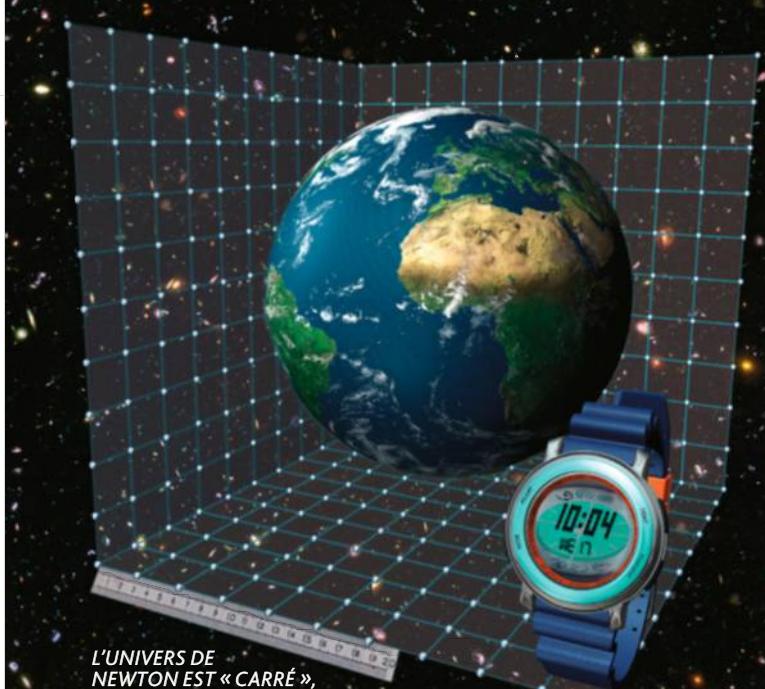
De son principe d'équivalence entre gravitation et accélération, Einstein déduit tout de suite un premier effet: la trajectoire d'un rayon lumineux peut se courber au voisinage d'une masse.

Pour comprendre, imaginons une fusée transparente filant verticalement à une vitesse très élevée et en accélération constante. Considérons également un rayon lumineux émis par une étoile lointaine, arrivant sur la fusée par la gauche. Pour un observateur immobile dans l'espace, le rayon traverse le vaisseau selon une ligne droite. Du fait du déplacement rapide du vaisseau, il pénètre par le haut de la paroi gauche et ressort par le bas de la paroi droite.

Mais pour le passager du vaisseau en accélération, la scène est sensiblement différente: il voit la lumière suivre une ligne courbe qui commence en haut de la paroi gauche et finit en bas de la paroi droite, comme si elle « tombait » vers le plancher!

Partant du principe que la lumière emprunte toujours le plus court chemin pour aller d'un point de l'espace-temps à un autre, Einstein en déduit que la géométrie de l'espace-temps à l'intérieur du vaisseau a été déformée par l'accélération et qu'elle y est devenue courbe. Du fait du principe d'équivalence entre gravitation et accélération, le physicien peut conclure que la gravitation infléchit le trajet de la lumière et que cette courbure révèle la géométrie même de l'espace-temps. Un champ gravitationnel déforme donc la géométrie de l'Univers !

... POUR  
LE PASSAGER  
DE LA FUSÉE,  
LA LUMIÈRE  
SUIT UNE LIGNE  
COURBE ET TOME  
VERS LE SOL

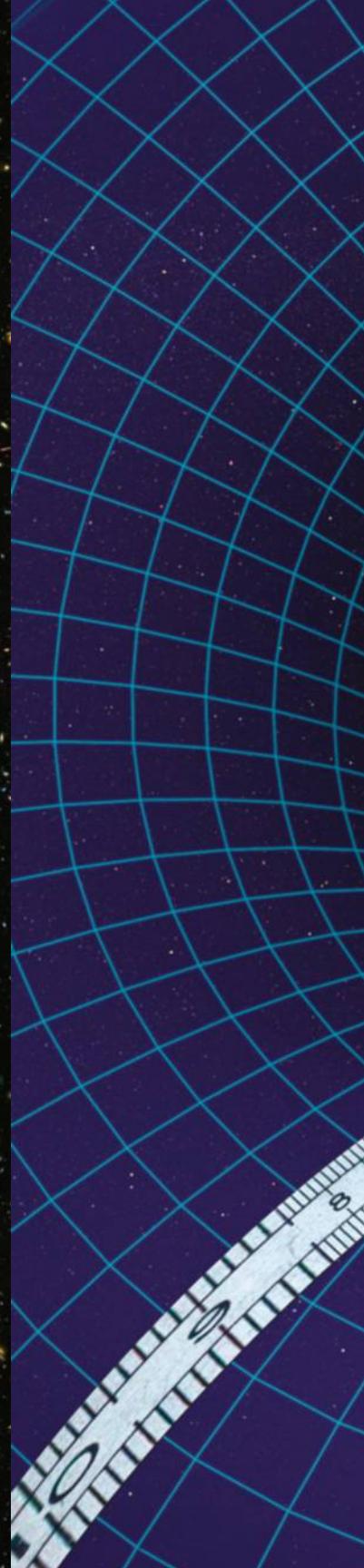


L'UNIVERS DE  
NEWTON EST « CARRÉ »,  
ET LE TEMPS, INDÉPENDANT  
DE L'ESPACE, EST LE MÊME  
EN TOUS SES POINTS.

DEUXIÈME  
CONSÉQUENCE

## *Le temps n'est plus universel*

Pour Newton, l'espace dans lequel s'inscrit l'Univers ressemble à un croquis d'architecte, quadrillé par de lignes invisibles qui se coupent à angles droits. Ces repères permettent de mesurer les 3 coordonnées nécessaires pour localiser un événement : largeur, hauteur, profondeur. Les dimensions d'un objet sont donc identiques quel que soit l'endroit où il se trouve. Quant au temps, il est totalement indépendant de l'espace, comme si une seule horloge donnait l'heure à tout l'Univers. L'Univers d'Einstein, en revanche, est un espace-temps élastique, courbe, déformé par tous les corps célestes qui s'y trouvent. Dans cet Univers, la lumière ne se déplace jamais en ligne droite, les 4 dimensions (largeur, hauteur, profondeur et temps) qui permettent de repérer toute chose sont indissociables et, si l'on peut mesurer les objets, leurs dimensions varient selon leur position dans l'espace-temps. Le temps n'est plus universel, il est différent en chaque point de l'Univers.





L'UNIVERS D'EINSTEIN  
EST COURBE  
ET LE TEMPS VARIE  
D'UN ENDROIT  
À UN AUTRE.



# *Ces savants qu'Einstein a inspirés*

Alors qu'Einstein prépare la relativité générale, d'autres savants, mathématiciens et physiciens, s'inspirent déjà de ses travaux. Certains proposant des solutions aux problèmes posés par la formulation de la théorie, d'autres en déduisant déjà de nouveaux modèles.

PAR ROMÁN IKONICOFF



## MINKOWSKI IL A CONÇU POUR LA RELATIVITÉ UN CONTINUUM ESPACE-TEMPS

HERMANN MINKOWSKI (1864-1909).  
LE MATHÉMATICIEN ALLEMAND PROPOSE UN  
CADRE GÉOMÉTRIQUE À QUATRE DIMENSIONS  
POUR LA RELATIVITÉ RESTREINTE.

Einstein y a d'abord vu un artifice de mathématicien, avant de réaliser qu'Hermann Minkowski, son ancien professeur au Polytechnicum, à Zurich, venait de faire une invention extraordinaire : la géométrie de l'espace-temps. On est au printemps 1908 et Einstein travaille déjà

à la relativité générale, sa prochaine théorie censée inclure la gravitation et généraliser le principe de relativité aux observateurs en mouvement accéléré et non-rectiligne. Minkowski est un pur mathématicien, mais son ami David Hilbert, mathématicien et physicien, l'entraîne en 1905 vers la physique fondamentale : les théories d'Einstein, de Poincaré, de Lorentz. En 1907, c'est le coup de génie : sur la base d'intuitions de Poincaré, il comprend que les équations de la relativité deviennent plus claires si on les regarde... en quatre dimensions. C'est avec les yeux de Riemann que Minkowski appelle à regarder, car c'est la géométrie riemannienne qui lui permet de définir un tel espace

et ses lois de géométrie. Les événements, les objets sont repérés par leur position sur l'horizontale (X), la verticale (Y) et la profondeur (Z), comme dans notre espace, et une quatrième coordonnée (T). Si l'on décide que T représente le temps de notre monde physique (en réalité, le temps  $t$  multiplié par  $c$ ), alors les équations de la relativité s'y fondent naturellement. Et le « groupe de Lorentz », version synthétique des équations de la relativité donnée par Poincaré, y prend un sens géométrique insoupçonné. Tout semble coller ! Le mathématicien s'attelle à traduire toute la théorie de la relativité restreinte dans son système, qu'il publie en 1908 (*Les Équations fondamentales des phénomènes électromagnétiques dans les corps en mouvement*). Minkowski crée un espace-temps qui n'est pas courbe – c'est un cas particulier de la géométrie de Riemann – mais c'est une trouvaille qui appelle immédiatement une réinterprétation des concepts d'espace et de temps. En septembre 1907, lors d'un congrès, Minkowski affirmait déjà : « Désormais, l'espace en lui-même et le temps lui-même sont voués à disparaître telles de simples ombres, et seulement une sorte d'union des deux conservera une réalité indépendante. » Quand Einstein réalise la portée physique de l'invention et l'évidence de son lien avec ses propres conceptions, il en fait le cadre mathématique de la relativité générale. Non sans l'avoir courbé.



En 1908,  
Minkowski publie  
un article dans  
lequel il adapte  
la relativité  
restreinte à un  
cadre où temps  
et espace sont  
intimement liés :  
c'est l'invention  
du continuum  
espace-temps.



**HILBERT**  
IL A TRADUIT  
LA COURBURE  
DE L'ESPACE-TEMPS  
EN ÉQUATION

DAVID HILBERT (1862-1943).  
LE MATHÉMATICIEN ALLEMAND  
DONNE, CINQ JOURS AVANT EINSTEIN,  
L'ÉQUATION DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE.

Après Poincaré, qui lui a disputé la vedette en 1905 pour la théorie de la relativité restreinte, un autre mathématicien de génie entre en compétition avec Einstein pour l'invention de la relativité générale : Hilbert. Le mathématicien allemand publie ses *Fondements de la physique* (texte qui contient l'essentiel des équations de la relativité générale et sera complété en décembre) le 20 novembre, 1915, cinq jours avant la publication par Einstein de ses *Équations de champ de la gravitation* ! Mais Hilbert est pour ainsi dire un outsider. Certes, il avait initié Minkowski à la physique d'Einstein en 1905, mais fin 1914, c'est Minkowski qui le ramène vers elle. Le mathématicien se prend alors de passion pour la relativité générale, lit les articles d'Einstein contenant des éléments de sa future théorie et invite le physicien à venir présenter ses recherches à l'université de Göttingen. Ce que fait Einstein entre le 28 juin et le 5 juillet 1915. Moins de cinq mois après, Hilbert et Einstein publient l'équation. Les relations épistolaires entre les deux savants, jusque-là très cordiales, tournent au vinaigre. Toutefois, Hilbert ne revendiquant pas la priorité sur Einstein, ils finissent par se réconcilier.

Le 20 novembre 1915, Hilbert publie ses équations de la relativité générale. Instruit par Einstein de ses difficultés à exprimer la courbure de l'espace-temps, le mathématicien a résolu le problème cinq jours avant le physicien !

pas la priorité sur Einstein, ils finissent par se réconcilier. Aujourd'hui, si les historiens admettent la simultanéité, voire l'antériorité de Hilbert, c'est tout de même à Einstein qu'est attribuée la paternité de l'équation, Hilbert n'étant reconnu que pour son apport sur la « courbure scalaire ». Car, cette fois, il y a des raisons à cette simultanéité: durant le séjour à Göttingen, Einstein s'ouvre à Hilbert des problèmes qu'il rencontre pour exprimer l'équation permettant de déduire la courbure locale de l'espace-temps en fonction de la répartition des masses et de l'énergie, courbure qui se traduit par un champ gravitationnel. Car si Einstein avait déjà énoncé les principes généraux de sa théorie, il se débattait depuis trois ans avec la géométrie riemannienne. La géométrie de l'espace-temps requiert, en effet, qu'on exprime les relations par des « tenseurs » (des matrices à 16 variables) répondant à une arithmétique complexe. Lors de leur rencontre, Einstein n'avait pas encore réussi à fixer tous les éléments formels de l'équation: elle ne permettait de retrouver ni la relativité restreinte ni la théorie de Newton (valide à l'échelle du système solaire) comme cas particuliers. Un problème mathématique qu'Hilbert sut résoudre en quelques mois.

Die Grundlagen der Physik.  
 (Kleinste Einheit.)

Von  
 Arnold Hilbert.

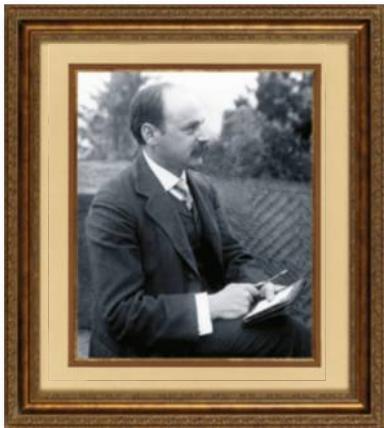
Versiegelt in der Münze vom 10. November 1918.

Die gewöhnlichen Erkenntnisse aus „Einstein I.“ sowie dessen weiterer Entwicklung erlauben uns, die Materie und die geistigen Zustände und zeitlichen Beziehungen, welche hier X-ray und Elektrizität aufweisen, halbes der Untersuchung der Physik und Wissenschaft zu schaffen.

Ich schließe an Folgendes an: „Die Kleinste Einheit“-Methode — wesentlich von zwei speziellen Axiomen ein neues System von Grundgesetzen der Physik ableitend, die von blauer Sichtbarkeit und grüner Unschärfe bestimmt sind — und die Theorie von Einstein und Hie gleichzeitig erklärenden. Die genauere Ausführung wird alle von mir spätere Anwendung meines Grundgedankens und die beschriebenen Fragen der Elektrizitätslehre beinhaltet.

Es seien  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  irgendwelche die Wellenpunkte wesentlich eindeutig bestimmende Koordinaten, die sogenannte Wirkspunkte (allgemeinere Name „Knot-Koordinaten“). Das gesuchtes in  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  ist:

- 1) die zusaätzlich aus Einstein stammenden Gravitationspotentiale  $\phi_1(a_1, a_2, a_3, a_4)$  mit symmetrischem Tensorcharakter gegenüber einer beliebigen Transformation des Wellenpunktes  $a_i$ ;
- 2) die zusaätzlich aus Einstein stammenden Potentiale  $v_i$ , mit Vektorschärfe im zugehörigen Raum.



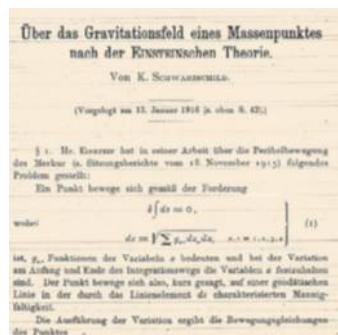
## SCHWARZSCHILD IL A PROPOSÉ LE PREMIER MODÈLE D'UNIVERS DÉRIVÉ DE LA RELATIVITÉ

KARL SCHWARZSCHILD (1873-1916).  
L'ASTROPHYSICIEN ALLEMAND PROPOSE  
LA PREMIÈRE MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE  
DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE.

« Comme vous le voyez, la guerre m'a traité avec assez de gentillesse, en dépit des coups de feu, pour me permettre de sortir de tout cela et profiter de cette promenade dans le pays de vos idées. » En décembre 1915, Einstein reçoit ces mots du lieutenant allemand Karl Schwarzschild, physicien et ancien collègue de Hilbert et de Minkowski à l'université de Göttingen, engagé sur le front russe. La lettre contient deux exposés de ses recherches sur les solutions de l'équation de la relativité générale publiée par Einstein fin novembre (Schwarzschild l'a lué au front et y a rédigé ses exposés). Einstein lui répond début janvier 1916. Il le félicite : « Je ne m'attendais pas à ce que quelqu'un puisse formuler la solution exacte du problème d'une manière aussi simple », et lui annonce qu'il présentera l'un des articles à l'Académie des sciences de Prusse le jeudi suivant (le second sera présenté quelques semaines plus tard). Schwarzschild, qui mourra en mai 1916 d'une maladie auto-immune, est le premier à avoir trouvé une solution à l'équation d'Einstein.

Dans ses articles, Schwarzschild simplifie l'équation. Car si elle est clairement posée, on est loin de savoir la résoudre. Elle est comme une recette indiquant le type de calcul à mener si l'on veut connaître l'état précis de l'espace-temps en un lieu-moment donné, sous telle ou telle répartition de matière-énergie. Mais ces calculs sont abstraits, impossible à résoudre avec la complexité du monde réel. Aussi, Schwarzschild, qui s'intéresse à la gravitation autour des étoiles, ne considère-t-il que le cas d'un Univers avec une seule étoile sphérique qui ne tourne pas sur elle-même. Avec ces hypothèses réductrices, Schwarzschild arrive à « dessiner » l'espace-temps à l'extérieur et à l'intérieur des étoiles non-tournantes de tout rayon. Dans son modèle, il élimine la présence de matière (l'étoile) pour ne garder que le profil géométrique de l'espace-temps (qui rend compte implicitement de la présence de masses). C'est alors un « vide » dont la géométrie est plate partout, sauf au voisinage d'un lieu-temps où elle se courbe en un creux parabolique. Schwarzschild l'ignore, tout comme Einstein à l'époque, mais son modèle est celui des fameux trous noirs, dont l'existence physique n'a été confirmée que progressivement à partir des années 1990. Aujourd'hui, la « métrique de Schwarzschild », le « rayon de Schwarzschild » sont très présents dans le vocabulaire de l'astrophysique fondamentale.

Schwarzschild présente, dès janvier 1916, un modèle d'espace-temps dont la géométrie se courbe en un creux parabolique. C'est celui d'un phénomène encore méconnu : le trou noir.





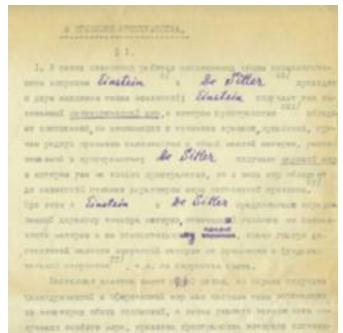
## FRIEDMANN IL A DÉDUIT DES ÉQUATIONS D'EINSTEIN UN UNIVERS EN ÉVOLUTION

ALEXANDRE FRIEDMANN (1888-1925).  
POUR LE MATHÉMATICIEN RUSSE, LES  
ÉQUATIONS DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE  
DÉCRIVENT UN UNIVERS DYNAMIQUE.

Dans un article paru le 29 mai 1922, le mathématicien russe Alexandre Friedmann montre qu'on peut dériver de l'équation de la relativité générale un modèle d'Univers qui évolue dans le temps. Einstein est ébranlé : il ne conçoit pas que le monde réel puisse être autre chose qu'invariable et éternel. Il considère donc le résultat du Russe comme un pur égarement mathématique. En septembre 1922, il lui réplique dans une courte note : « Votre Univers non-stationnaire m'a semblé suspect [car] il n'est pas en accord avec les équations de champ », avant de réaliser que c'est son propre contre-argument qui est erroné et le modèle de Friedmann, valide. Néanmoins, Einstein persiste dans son refus. En 1924, Friedmann récidive, en démontrant cette fois la possibilité d'un Univers dont les dimensions spatiales varient en fonction du temps, soit dans le sens d'une contraction de l'espace, soit dans celui de son expansion. La controverse se résoudra par la mort de Friedmann de fièvre typhoïde en 1925, et par l'abdication progressive d'Einstein face à la cohérence du modèle avec expansion et aux preuves observationnelles.

Car en 1922, cela fait au moins une décennie que les astronomes admettent le phénomène de « rougissement » de la lumière provenant des astres lointains. Cet effet, découvert en 1842 par l'Autrichien Christian Doppler (et redécouvert en 1848 par le physicien français Hippolyte Fizeau), résulte de l'éloignement de la source lumineuse par rapport à l'observateur. En 1912, l'Américain Vesto Slipher a prouvé que la plupart des galaxies spirales connues présentent un effet de rougissement, ce qui indique donc leur fuite.

Du côté de la théorie, Einstein est dépassé par sa propre équation. Dans son article de février 1917 instaurant son modèle cosmologique stationnaire, il a procédé à une « intégration » de l'équation de la relativité durant laquelle il a introduit un nouveau nombre – la « constante cosmologique » – dont la valeur, arbitrairement choisie par Einstein, lui a permis de faire coller le résultat du calcul à sa vision statique de l'Univers. Or cette constante est une mine pour Friedmann : en modifiant sa valeur, l'Univers perd son caractère stationnaire pour se mettre à gonfler ou dégonfler. Bientôt un jeune abbé physicien belge, Georges Lemaître, aura, de son côté, la même idée.



Heurtant la vision stationnaire de l'Univers d'Einstein, Friedmann affirme, en 1922, que l'équation de la relativité générale permet d'imaginer un Univers évolutant dans le temps. Une vision déjà corroborée par les observations des astronomes.

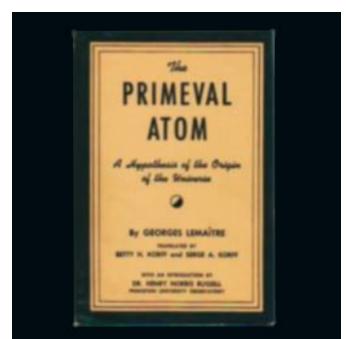


## LEMAÎTRE IL A IMAGINÉ LA NAISSANCE DE L'UNIVERS

GEORGES LEMAÎTRE (1894-1966).  
LE CHANOINE CATHOLIQUE BELGE,  
ASTRONOME ET PHYSICIEN, EST LE PÈRE  
DE LA THÉORIE DU BIG BANG.

Pour le jeune Georges Lemaître, 1923 est une année décisive : ordonné prêtre par l'église catholique, il est aussi admis à la prestigieuse université de Cambridge comme étudiant-chercheur en physique. Si la double casquette de scientifique et d'homme d'église parasitera ses deux carrières, l'une étant utilisée par certains pour dénigrer l'autre, il n'en est pas moins reconnu aujourd'hui comme un des plus importants cosmologistes de l'histoire. Il est en effet le père du big bang, le modèle donnant à l'Univers une histoire et un âge : 13,8 milliards d'années. Mais en avril 1927, lorsqu'il publie *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant* dans les *Annales de la Société scientifique de Bruxelles*, son article passe inaperçu. Lemaître y prouve pourtant l'adéquation entre les observations du rougissement des galaxies et un modèle d'Univers en expansion qu'il a dérivé, comme Friedmann, de l'équation de la relativité. Il fournit même une bonne estimation du taux d'expansion (qui ne sera officiellement découvert qu'en 1929 par l'astronome américain Edwin Hubble). Quand il rencontre Einstein en octobre, au cinquième Congrès Solvay, à Bruxelles, ce dernier rejette sa théorie, convaincu que l'Univers est stationnaire. Mais en 1929, c'est le coup de tonnerre : Hubble publie la preuve de l'expansion. Lemaître saisit l'occasion pour envoyer son article de 1927 à Arthur Eddington, astronome britannique de renom et l'un des premiers partisans de la relativité. Eddington fait republier l'article, qui paraît en 1931 dans les *Notes mensuelles de la Royal Astronomical Society*. Le modèle de Lemaître de 1927 est désormais dans la course. Mais celui-ci formule déjà une nouvelle hypothèse : si l'Univers est en expansion aujourd'hui, il était donc plus dense et condensé dans le passé. Il émet l'idée d'un état si ramassé que l'espace-temps lui-même n'aurait plus de sens, nomme cet état « atome primitif » et en fait l'acte de naissance de l'Univers. Les attaques pleuvent. À la fin d'une conférence donnée par Lemaître en Californie en 1933, Einstein, qui voyage avec lui, se lève et applaudit : « C'est la plus belle et satisfaisante explication de la Crédation que j'aie jamais entendue. » L'ironie n'échappe pas au Belge... La reconnaissance finira par arriver en 1965, un an avant sa mort : des radioastronomes détectent un rayonnement cosmique prédict par ce qui, désormais, porte le nom de « modèle standard du big bang ». Son idée folle est confirmée.

Au début des années 1930, Lemaître décrit l'origine de l'Univers, d'abord condensé en un « atome primitif », avant de connaître une phase d'expansion. Une théorie dont se moquera Einstein.





▲ Les années 1920 marquent l'essor de la physique quantique, notamment grâce aux premiers détecteurs de particules (ici, une chambre à brouillard).

# MÉCANIQUE QUANTIQUE

# Et Einstein recula devant son génie

Alors qu'il fut l'un des fondateurs de la physique quantique, le père de la relativité générale ne s'est jamais résolu à accepter l'interprétation probabiliste de cette théorie. Elle contredisait, en effet, sa conception causale de la physique.

D'APRÈS CÉCILE BONNEAU  
ET NICOLAS CONSTANS

Einstein est connu pour être le père de la relativité générale. Mais il est aussi, en grande partie, celui de la physique quantique. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, la physique classique est tenue en échec par une petite anomalie presque insignifiante : le problème du rayonnement du corps noir. Une expression étrange pour désigner un phénomène très familier : lorsque l'on chauffe un corps, il se met à émettre de la lumière, même s'il est totalement noir. Un métal, par exemple, devient rouge, puis rouge vif, puis orange, puis jaune... à mesure que sa température augmente. Les deux théories phares du XIX<sup>e</sup> siècle, l'électromagnétisme (qui décrit le rayonnement lumineux) et la thermodynamique (qui explique la chaleur), devraient donc s'associer pour rendre compte de cette banale observation. Or il n'en est rien ! Pire : elles prédisent que le corps rayonne une quantité d'énergie infinie. Absurde !

Max Planck, qui s'attaque au sujet en 1900, en vient, pour le résoudre, à faire une hypothèse qu'il



Au fond (de g. à dr.): A. Piccard, É. Henriot, P. Ehrenfest, É. Herzen, T. de Donder, E. Schrödinger, J.-É. Verschaffelt,

Au milieu: P. Debye, M. Knudsen, W. L. Bragg, H. Kramers, P. Dirac, A. Compton,

Au premier rang: I. Langmuir, M. Planck, M. Curie, H. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin,

juge lui-même « désespérée » : il faut, dit-il, imaginer que le corps et le rayonnement n'échangent pas de l'énergie de manière continue, mais sous forme de petits « quanta » discontinus. À cette étrange condition, il obtient une description correcte du phénomène. La physique « quantique » voit ainsi le jour. Mais Planck n'accorde pas à cette théorie de signification physique... tandis qu'Einstein franchit ce pas en 1905. Dans son article révolutionnaire, *Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière*, il considère l'énergie lumineuse comme « constituée d'un nombre fini de quanta d'énergie, localisés en des points de l'espace [...] ne pouvant être absorbés ou produits que d'un bloc ». Autrement dit, il affirme que la lumière, bien connue pour être une onde, est faite de grains. À partir de là, il explique l'effet photoélectrique (un échange d'énergie entre la lumière et les électrons), une interprétation qui sera corroborée par les expériences que l'Américain Robert Millikan mène

entre 1912 et 1915. Celles-ci montrent en particulier que, comme Einstein l'avait prédit, l'énergie de ce grain de lumière est égale à la fréquence de l'onde lumineuse multipliée par une constante, la constante de Planck. Einstein en conclut, en 1909, que la nature de la lumière est double : onde et particule.

### L'INACCEPTABLE RÔLE DU HASARD

En 1913, il salue le modèle d'atome développé par Bohr. Celui-ci propose que les électrons circulent sur des orbites autour du noyau. Plus l'orbite est haute, plus l'énergie de l'électron est élevée. Les électrons peuvent changer d'orbite en sautant d'un niveau d'énergie à l'autre, en émettant ou en absorbant des quantités précises d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Sauf qu'avec ce modèle, la causalité est mise en défaut. Car, ainsi qu'Ernest Rutherford le demande à Bohr, comment un électron choisit-il le palier sur lequel il va descendre ? « *Il m'apparaît*, ajoute le savant anglais, que



W. Pauli, W. Heisenberg, R. H. Fowler, L. Brillouin

L. de Broglie, M. Born, N. Bohr

C. E. Guye, C. T. R. Wilson, O. W. Richardson

< Les congrès Solvay (ici, celui de 1927) ont permis à la physique quantique d'avancer en provoquant le débat entre les meilleurs physiciens de l'époque.

répond Bohr. « Cependant, ajoute-t-il, il subsistait certaines différences dans nos attitudes et nos tendances. » Car Einstein, passé maître dans l'art de synthétiser des situations en apparence contradictoires, pensait que l'abandon de la causalité n'était que provisoire. « La mécanique quantique force le respect. Mais une voix intérieure me dit que ce n'est pas encore la juste vérité. La théorie apporte beaucoup, mais elle nous conduit à peine plus près du secret de Dieu. En tout cas, je suis convaincu que Dieu ne joue pas aux dés. » Cette phrase célèbre, écrite au physicien de Göttingen Max Born, le 4 décembre 1926, et qu'Einstein répète de vive voix en d'autres occasions, notamment à Wolfgang Pauli, résume bien l'état d'insatisfaction dans lequel le laissait la mécanique quantique. Car, à partir d'une situation donnée, celle-ci prévoit plusieurs issues possibles : une même cause donne lieu à plusieurs effets, entre lesquels Dieu choisit d'un coup de dés.

Comme le résume son biographe Abraham Pais : « La physique quantique demeura pour Einstein un phénomène de crise. Si son point de vue sur la nature de cette crise put changer, la crise, elle, ne disparut jamais. Cela l'amena à aborder les problèmes quantiques avec une prudence extrême. » Einstein s'emploierait souvent, notamment lors des congrès Solvay de 1927 et 1930, à produire des expériences de pensée accablant la théorie quantique et son inacceptable penchant pour l'aléatoire, refusant l'idée de Bohr, selon laquelle la causalité n'a pas de sens en physique quantique : « On a parfois dit, écrit celui-ci, que [la théorie quantique] laissait de côté l'idée de causalité. Je crois qu'il faudrait plutôt dire que nous essayons d'exprimer des lois de la nature qui se situent si profond qu'elles ne peuvent pas être visualisées, ou bien dont on ne

*vous devez faire l'hypothèse que l'électron sait déjà où il va s'arrêter.* » Étonnamment, c'est Einstein lui-même qui, en 1917, introduit des probabilités plus ou moins grandes de passer d'un palier à l'autre. À cette occasion, il commente ainsi la théorie : « Sa faille réside dans le fait qu'elle ne nous offre pas de connexion plus étroite avec la théorie ondulatoire et

## **Selon la mécanique quantique, une même cause donne lieu à plusieurs effets, entre lesquels Dieu choisit d'un coup de dés**

*qu'elle laisse au hasard l'instant et la direction des processus élémentaires ; je crois néanmoins en toute confiance que nous sommes sur la bonne voie.* »

Bohr et Einstein font connaissance en 1920 et, intellectuellement, c'est le coup de foudre. « J'ai rarement rencontré un homme qui m'ait procuré une telle joie par sa seule présence », écrit Einstein. « Vous rencontrer et parler avec vous a été l'une des plus grandes expériences que j'ai jamais faite », lui

*peut pas rendre compte au moyen de la description ordinaire en termes de mouvement. »*

Il n'empêche. Jusqu'à la fin de sa vie, Einstein n'a de cesse, sans nier sa fécondité, de se débattre avec la quantique. D'après Abraham Pais, il était persuadé qu'elle n'était qu'un cas particulier d'une théorie qui restait à découvrir... en repartant de zéro. Une théorie qui unifierait enfin ses deux enfants terribles, la relativité générale et la physique quantique.

LE MEILLEUR DE  
SCIENCE & VIE



Prix public: 29€  
**27,55€**

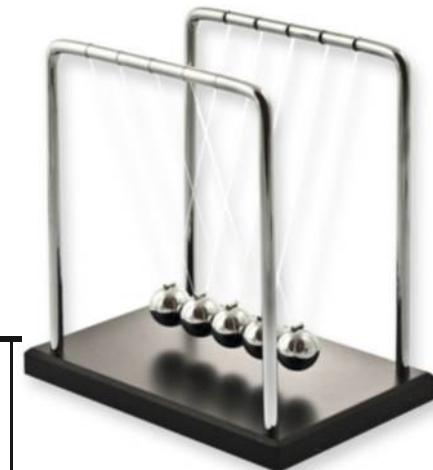
RÉDUCTION  
SPEZIALE -5%

## 201 records choisis par la rédaction de **Science & Vie**

Retrouvez les exploits accomplis par notre planète et ses animaux dans ce très bel ouvrage scientifique.

### La Terre de tous les records

DIM. 22 x 24,5 CM. 240 PAGES.  
Coédition LA MARTINIÈRE et **SCIENCE & VIE**.



## Un classique scientifique à offrir

Vous le savez sans doute, ce pendule de Newton illustre les théories de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie. Et en plus, avec son socle en bois et ses billes de gros diamètre, c'est un bel objet de décoration.

### Pendule de Newton Deluxe - 19,90€

DIM. 18 x 17,5 x 12 CM. SOCLE NOIR EN BOIS. MÉTAL ARGENTÉ. BILLE DIAM. 1,8 CM.

## L'OUVRAGE ÉVÉNEMENT SUR MARS!



+ de 400 illustrations  
format gigantesque!

**79€**  
seulement!

LIVRAISON RAPIDE  
COLISSIMO  
OFFERTE

Offrez-vous cet ouvrage magnifique, richement illustré de photographies réalisées par la NASA et vous dévoilant les mystères de Mars, à partir des toutes dernières découvertes. Les paysages astronomiques sont tout simplement éblouissants.

### Mars

AUTEUR : GILES SPARROW. DIM. 35,3 x 43 CM.  
224 PAGES. Coédition **SCIENCE & VIE** ET  
TÉLEMAQUE.

**PARTENARIAT**  
**SCIENCE & VIE**



**Gardez  
vos chaussures  
toujours impeccables !**

Cirez vos chaussures en 1 minute sans vous baisser ni vous salir les mains. Munie de différentes brosses à poils plus ou moins durs, d'une brosse pour les chaussures claires et d'une autre pour les foncées, elle s'adapte à toutes vos chaussures et les nettoie complètement.

### Cireuse à chaussures automatique **Clean Up** - 79€

DIM. : 37 x 20 x 29 CM. 7 KG. Bois / métal. ALIMENTATION SECTEUR : 220V / 90W. CAPACITÉ DU RÉSERVOIR DE CIRE : 150 ML.  
ROTATION : 1400 TR/MIN.  
LA CIRE SE TROUVE DANS VOS MAGASINS HABITUELS.



## FONCTIONNE À L'AIR COMPRIMÉ!

**NOUVEAU**

### Construisez une voiture à air comprimé!

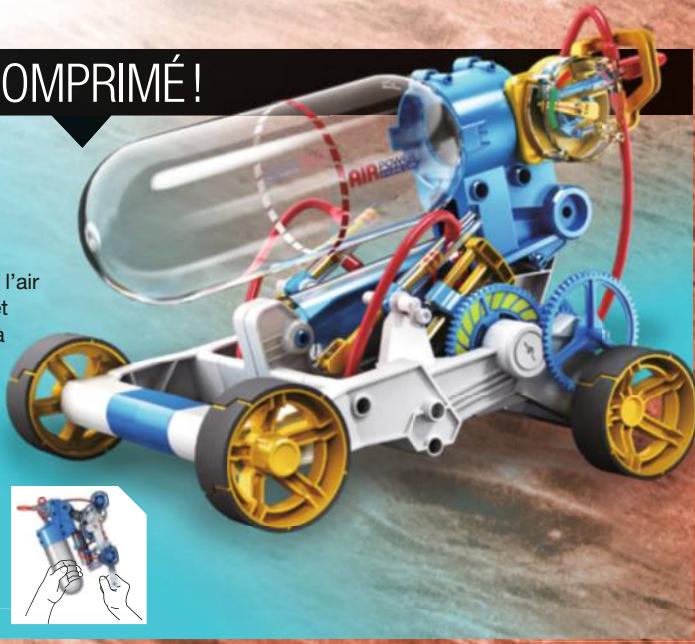
Simple et ludique, ce kit de montage vous permet de réaliser une voiture fonctionnant à l'air comprimé, l'énergie gratuite par excellence et non polluante! Actionnez ensuite sa pompe à air. Votre voiture se met à rouler à la vitesse de 15 km/h sur une distance de 50 m.

#### Kit de construction

#### Voiture à air comprimé

ENVIRON 100 PIÈCES À MONTER.  
MATIÈRE PLASTIQUE ET MÉTAL.

LE KIT DE CONSTRUCTION  
**29,90 €**  
seulement



#### POUR COMMANDER ET S'INFORMER



[www.laboutiquescienceetvie.com](http://www.laboutiquescienceetvie.com)

Exclusivité Internet : Livraison en Points Relais®, PayPal®

Renvoyez le bon de commande avec votre règlement à  
**La Boutique SCIENCE & VIE - CS 30271 - 27 092 ÉVREUX CEDEX 9**

**01 46 48 48 83** (6 jours/7 paiement CB uniquement)

EN CADEAU pour toute commande

le livret «Drôle de science»  
avec le code avantage **341 842**



À RENVOYER DANS UNE ENVELOPPE AFFRANCHIE AVEC VOTRE RÉGLEMENT À :  
**LA BOUTIQUE SCIENCE & VIE - CS 30271 - 27 092 ÉVREUX CEDEX 9**

## BON DE COMMANDE

Articles	Réf.	Quantité	Prix	Sous-total
Livre «La Terre de tous les records»	305.821	x	<b>27,55 €</b>	= <b>€</b>
Pendule de Newton Deluxe	365.189	x	<b>19,90 €</b>	= <b>€</b>
Livre «Mars»	382.614	x	<b>79 €</b>	= <b>€</b>
Cireuse à chaussures automatique <i>Clean Up</i>	385.880	x	<b>79 €</b>	= <b>€</b>
Kit de construction Voiture à air comprimé	388.108	x	<b>29,90 €</b>	= <b>€</b>
<b>SOUS-TOTAL</b>				<b>€</b>
Avec ma commande, je reçois en <b>CADEAU</b> le livret «Drôle de science»			<b>OFFERT</b>	
<b>FRAIS D'ENVOI</b> (cocher la case de votre choix)				
<b>Frais d'envoi offerts</b> <b>dès 39 € de commande!</b>				
<input type="checkbox"/> Envoi normal			<b>6,90 €</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Ma commande atteint <b>39 €</b>			<b>GRATUIT</b>	
<input type="checkbox"/> Envoi Colièco				
<input type="checkbox"/> Livraison rapide Colissimo			<b>7,90 €</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Ma commande atteint <b>55 €</b>			<b>GRATUIT</b>	
<input type="checkbox"/> Livraison rapide Colissimo				
<b>TOTAL</b>				<b>€</b>

Offres valables en France métropolitaine uniquement dans la limite des stocks disponibles jusqu'au 31/12/2015. Délai de livraison des produits : maximum 2 semaines après l'enregistrement de votre commande sauf si envoi par Colissimo (5 jours max.). Selon l'article L121-21 du code de la consommation, vous disposez d'un délai de 14 jours pour changer d'avis et nous retourner votre colis dans son emballage d'origine complet. Le droit de retour ne peut être exercé pour les enregistrements vidéo dessinés. Les frais d'envoi et de retour sont à votre charge. En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de Mondadori. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. Cochez la case si refus □

#### > Mes coordonnées

CODE AVANTAGE : 341 842

M.  Mme  Mlle

Nom \_\_\_\_\_ Prénom \_\_\_\_\_

Adresse \_\_\_\_\_

Complément d'adresse  
(résidence, lieu-dit, bâtiment) \_\_\_\_\_

CP \_\_\_\_\_ Ville \_\_\_\_\_

Tél. \_\_\_\_\_

Grâce à votre N° de téléphone (portable) nous pourrons vous contacter si besoin pour le suivi de votre commande.

E-mail \_\_\_\_\_

Je souhaite bénéficier des offres promotionnelles des partenaires de *Science & Vie* (groupe Mondadori)

#### > Mode de paiement

Je joins mon chèque bancaire ou postal à l'ordre de SCIENCE & VIE

#### Je règle par carte bancaire

Je règle en 1 fois la totalité de ma commande

Je règle en 3 fois sans frais (à partir de 99€ d'achat)

Carte bancaire N° \_\_\_\_\_

Expire fin : \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ Date et signature obligatoires \_\_\_\_\_

Cryptogramme \_\_\_\_\_

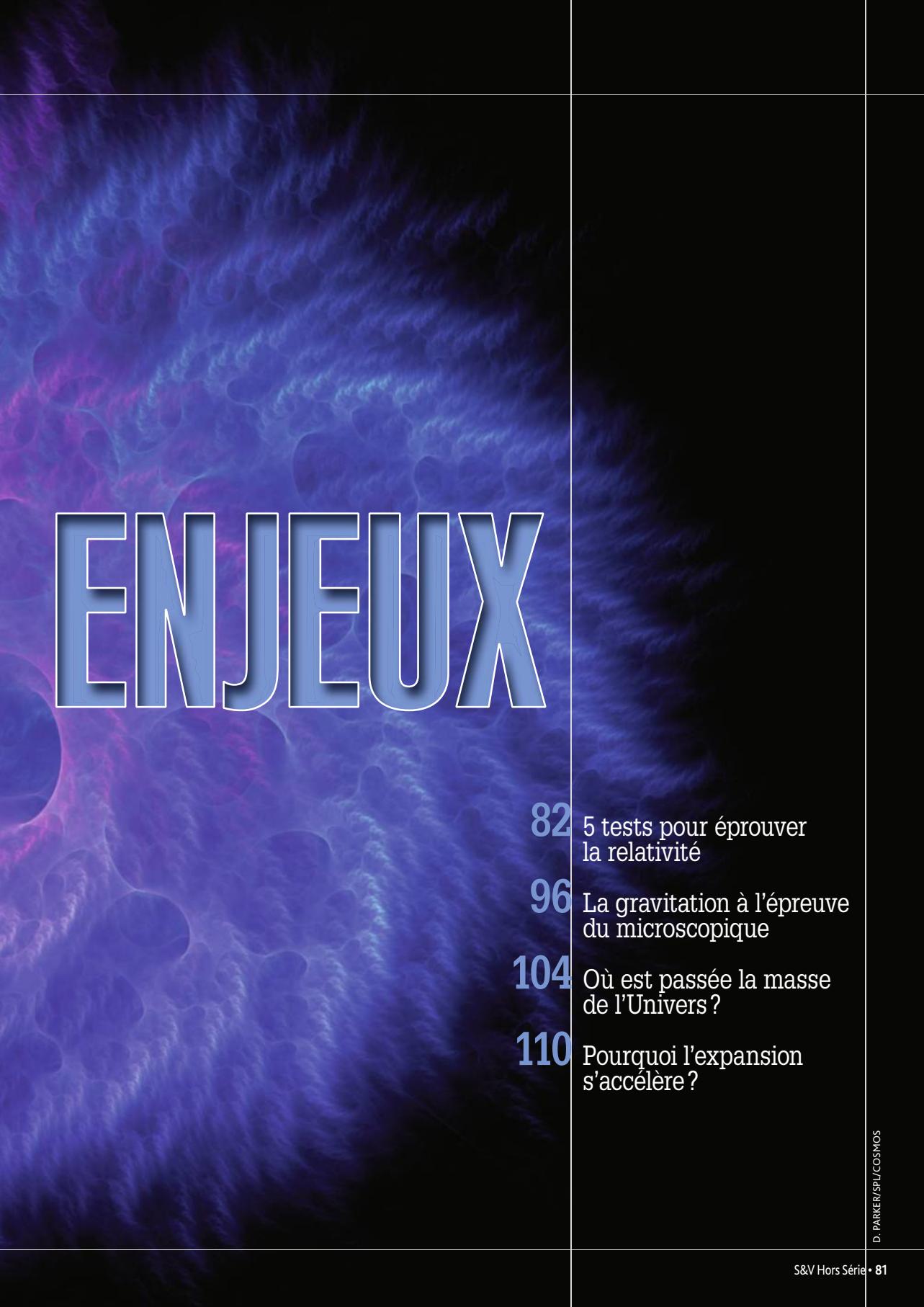
Les 3 chiffres au dos de votre CB \_\_\_\_\_



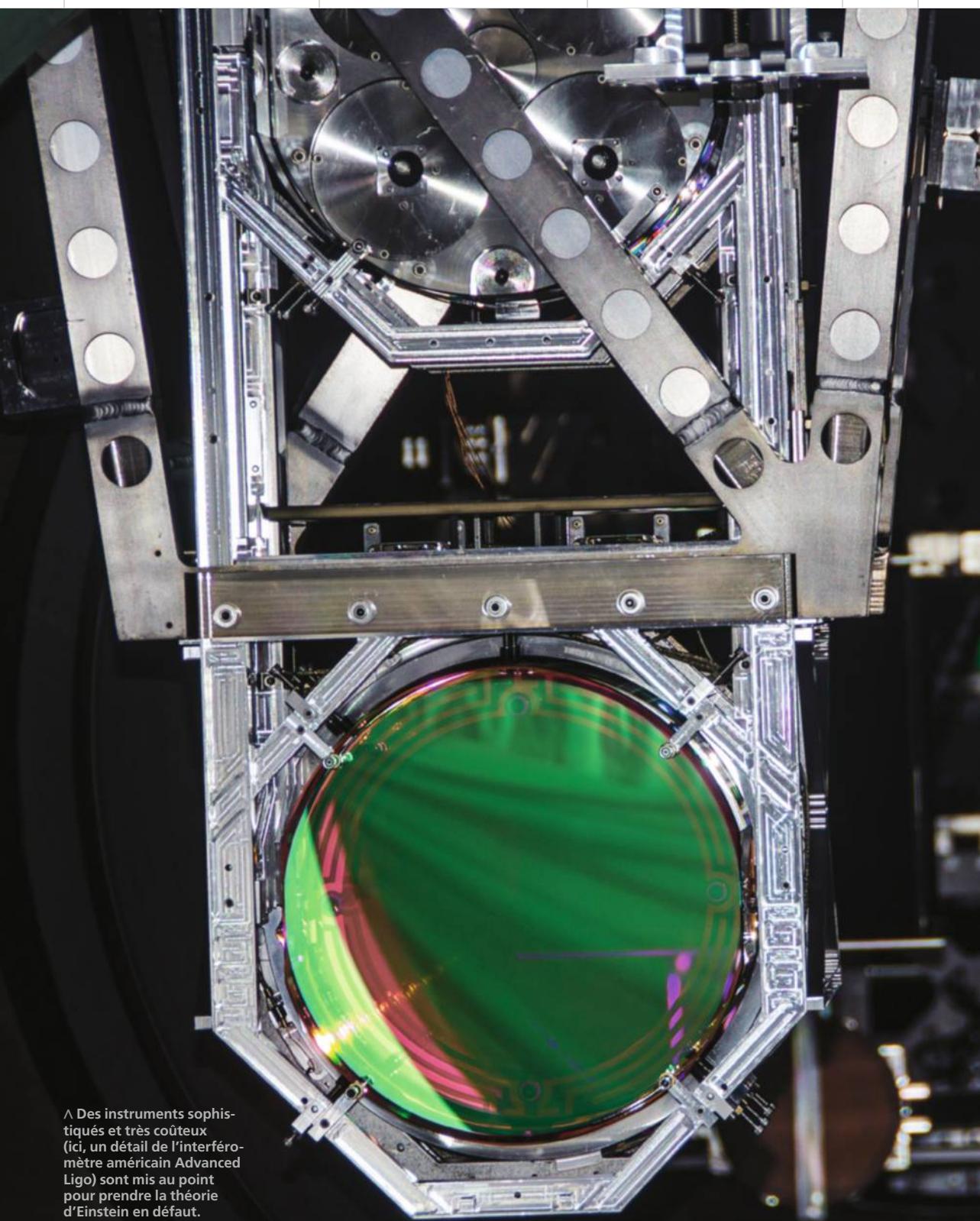
**LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE**

**2015 SES**

# ENJEUX



- 82** 5 tests pour éprouver la relativité
- 96** La gravitation à l'épreuve du microscopique
- 104** Où est passée la masse de l'Univers ?
- 110** Pourquoi l'expansion s'accélère ?



▲ Des instruments sophistiqués et très coûteux (ici, un détail de l'interféromètre américain Advanced Ligo) sont mis au point pour prendre la théorie d'Einstein en défaut. Jusqu'ici... en vain.



Jusqu'ici, tous les tests l'ont invariablement confirmée. Pourtant, les physiciens le savent, la relativité générale n'est pas parfaite. Ils continuent donc à en chercher la faille en mettant au point de nouvelles observations, toujours plus fines.

# 5 tests pour éprouver la relativité

**I**es résultats se suivent... et se ressemblent désespérément. Que l'on examine la ronde des planètes, que l'on mette à l'épreuve le principe d'équivalence, que l'on mesure les infimes variations temporelles prévues par la théorie... chaque nouveau test auquel on soumet la relativité générale finit par accoucher de la même conclusion victorieuse. Il n'y a pas un piège tendu que la relativité générale ne sache déjouer ! Et la situation est loin de faire le bonheur des physiciens. Car ils le savent : il y a un problème quelque part. La relativité générale ne parvient pas à s'accorder à la mécanique quantique, et n'est fatalement qu'un

simple « cas particulier » d'une théorie plus globale que les théoriciens essaient de développer (voir p. 96). Le problème, c'est que ces derniers n'ont aucun indice expérimental à écrire sur leur tableau noir. Et il manque encore aux héritiers d'Einstein des faits précis, tangibles, sur lesquels s'appuyer pour avancer. Quand il entreprit d'élaborer une nouvelle théorie de la gravitation, Einstein savait, lui, que celle de Newton échouait par exemple à rendre compte des mouvements de la planète Mercure. C'était un minuscule défaut, certes, mais il fut salvateur. D'où viendra la faille cette fois-ci ? Les expérimentateurs du xx<sup>e</sup> siècle sont mis au défi de la révéler.

# 1 L'analyse des trajectoires des corps célestes

Jusqu'ici, la théorie d'Einstein a toujours parfaitement décrit le mouvement des astres. Mais grâce à des mesures plus fines, les astronomes espèrent la prendre en défaut.

*« Je suis persuadé que cette découverte fut, et de loin, la plus grande expérience émotionnelle qu'Einstein ait connue dans sa vie scientifique. Peut-être même dans son existence »,* écrit le physicien Abraham Pais dans la biographie qu'il a consacrée au père de la relativité, dont il fut le collègue et l'ami. Cette découverte bouleversante, c'est tout simplement le premier « test » de la relativité générale. En effet, à peine Einstein a-t-il posé sa nouvelle équation qu'il note qu'elle permet de rendre compte du mouvement de Mercure, qui ne suit pas exactement la loi de Newton (voir ci-dessous). En effet, la position privilégiée de Mercure tout près du Soleil la place dans la zone la

plus intense de son champ de gravitation, région idéale pour vérifier la très légère différence entre les résultats de l'équation de Newton et de celle d'Einstein.

## VALIDÉE PAR UN PULSAR

Pendant des années, les scientifiques ont cherché d'autres tests à réaliser pour vérifier que la ronde des astres suivait bien la chorégraphie dictée par Einstein, mais les effets sont négligeables pour presque tous les autres corps connus. Ce n'est qu'avec la découverte, en 1974, du pulsar binaire PSR B1913+16 qu'émerge une nouvelle possibilité de test. Cet objet rare est un système composé d'une étoile à neutrons (étoile très compacte en fin de vie)

## LE TEST HISTORIQUE

C'est le Français Le Verrier qui a décelé l'anomalie de Mercure en 1859 : à chaque rotation autour du Soleil, son orbite se décale de 43 secondes d'arc, soit plus que ne le prévoient les lois de Newton. L'astronome pense expliquer ce décalage aisément : comme l'anomalie de l'orbite d'Uranus, causée par une planète alors inconnue (Neptune, découverte grâce à ses calculs en 1846), celle de Mercure est sûrement due à la présence d'une planète voisine. Mais malgré des décennies de recherche, l'astre hypothétique demeure invisible... Ce n'est qu'avec les équations de la relativité générale que l'anomalie de l'orbite de Mercure est enfin élucidée.



et d'un pulsar (étoile à neutrons en rotation très rapide sur elle-même émettant de façon très régulière une radiation électromagnétique). Deux étoiles tellement proches l'une de l'autre que le système entier tient dans le volume du Soleil. Le champ gravitationnel qui les lie est donc incroyablement fort, et les astronomes ont pu vérifier que, comme pour Mercure gravitant autour du Soleil, le mouvement relatif de ces deux astres n'est pas conforme aux lois de Newton, mais répond sans faille à celles de la relativité générale.



< En 1915, Mercure a permis de valider la relativité générale, son orbite présentant une anomalie selon les lois de Newton, mais correspondant parfaitement aux équations d'Einstein.

V Mais qui sait si, en 2024, les mesures plus fines du mouvement de Mercure (qui devraient être réalisées par la mission BepiColombo, ci-dessous) confirmeront encore la théorie ?

mission. Car elle affiche un léger retard sur la trajectoire prévue. Les ingénieurs examinent d'abord toutes les possibilités techniques pouvant expliquer cette anomalie, mais n'en retiennent aucune. Se pourrait-il qu'elle soit révélatrice d'une faille dans les lois de la gravitation, perceptible uniquement à cette distance lointaine du Soleil ? L'hypothèse fait sensation et mobilise quelques chercheurs enthousiastes durant des années. Hélas, en 2012, la Nasa rend des conclusions décevantes : c'est le rayonnement infrarouge des réacteurs nucléaires transportés par la sonde qui est probablement à l'origine de son retard.

Aujourd'hui les astronomes se tournent vers celle par qui la légitimité de la théorie est apparue : Mercure. La prochaine mission qui partira l'explorer, BepiColombo, se placera en orbite autour de la planète en 2024 pour étudier sa surface. Mais elle sera aussi chargée de mesurer plus finement le décalage de son orbite. Et si une nouvelle anomalie de Mercure venait ouvrir la voie à la théorie qui détrônerait enfin Einstein ? CÉCILE BONNEAU

À l'époque, les preuves de la validité de la théorie étaient rares et précieuses, le résultat était donc réjouissant. Mais aujourd'hui, les astronomes rêvent, au contraire, d'un astre dont la course viendrait enfin réfuter la théorie. Où chercher ? À la fin des années 1990, un espoir surgit : il s'agit de la sonde *Pioneer 10*, perdue aux confins du système solaire. La Nasa est en effet perplexe, depuis 1980, devant le comportement de cette sonde partie en 1972 pour photographier Jupiter et qui a continué sur sa lancée après la fin de sa



# 2 L'observation des déviations de la lumière

C'est un test qu'Einstein a lui-même imaginé : mesurer la déviation des rayons lumineux au voisinage d'objets massifs. Un effet maintes fois observé qui est une mine d'informations.

À la différence de la gravitation newtonienne, dans laquelle la lumière ne subit aucune attraction gravitationnelle et circule en ligne droite, la courbure de l'espace-temps engendre naturellement une courbure des rayons lumineux au voisinage des masses. Dans son article de novembre 1915, Einstein propose donc de mesurer la déviation d'un rayon lumineux au voisinage du Soleil. Un test effectué avec succès quatre ans plus tard par l'astronome britannique Eddington (voir ci-dessous).

Aujourd'hui, la courbure de la lumière sous l'effet des masses avoisinantes est devenue si familière qu'elle n'est plus un test de la relativité, mais un outil d'astronome ! Imaginons, en effet, qu'un objet très massif, comme un amas

de galaxies, soit situé entre un observateur et une galaxie très lointaine. En déformant les rayons lumineux venus de la galaxie, l'amas agira comme une loupe qui amplifiera l'image, la déformerà et, dans le cas le plus extrême, lui fera même prendre la forme d'un anneau entourant l'amas !

## ESTIMER LES AMAS PROCHES

La première de ces déformations observée, un arc gravitationnel autour de l'amas Abell 370, fut découverte en 1985 par une équipe d'astrophysiciens de Toulouse. Une révolution ! Car on pensait jusqu'alors que l'effet, trop subtil pour être observé, n'existant qu'en théorie. Incrédule, l'équipe attendit d'ailleurs plus de un an avant de se résoudre à publier



son résultat. Mais depuis, les astronomes voient des arcs partout ! Et ils s'en servent même pour évaluer la masse des amas de premier plan (elle est d'autant plus importante que l'image de second plan est déformée).

Une mesure capitale pour « penser » l'Univers et évaluer le rapport entre sa masse visible (étoiles, galaxies...) et invisible (la fameuse « matière noire », qui représenterait plus de 80 % de la masse totale). Mais ce n'est pas tout. Les astronomes utilisent aussi cet effet pour traquer les exoplanètes. En observant très finement la luminosité d'une étoile lointaine, il est en effet possible de débusquer les corps qui lui passent devant. Si la lumière de l'étoile s'amplifie une première fois au passage

## LE TEST HISTORIQUE

C'est le deuxième test de la relativité générale (après celui de l'anomalie de l'orbite de Mercure), mais c'est le plus retentissant, celui qui rendra Einstein et la relativité générale célèbres. L'astronome britannique Arthur Eddington, très enthousiaste vis-à-vis de la théorie de 1915, décide de monter une expédition dans l'hémisphère Sud pour observer une éclipse totale de Soleil prévue le 29 mai 1919. Car une fois le Soleil occulté, il devient possible de vérifier qu'il dévie la lumière des étoiles situées loin derrière lui. C'est bien ce qu'observera Eddington.



À Prédits par Einstein, ces arcs lumineux sont dus à la déviation par un gros amas de la lumière provenant d'étoiles situées au second plan.

> La sonde *Gaia* recensera les astres de notre galaxie avec une précision de quelques microsecondes d'arc. De quoi relever des anomalies ?

d'une étoile, puis une deuxième fois un peu plus tard, il y a fort à parier que l'étoile du premier plan était accompagnée d'une planète !

Mais les lentilles gravitationnelles pourraient bien reprendre du service pour tester – et si possible prendre en défaut – la relativité générale, grâce à la sonde *Gaia*, en service depuis 2014. Chargée de cartographier la Voie lactée, elle devrait mesurer les minuscules déviations des rayons lumineux avec une précision inégalée. CÉCILE BONNEAU

# 3 Les tests du principe d'équivalence

Le principe selon lequel tous les corps chutent à la même vitesse est au cœur de la relativité. Les chercheurs s'évertuent donc concevoir des expériences qui contrediraient cette loi.

C'est le principe à la base de la relativité générale : tous les objets chutent de la même manière dans un champ de gravitation, quelle que soit leur masse. L'idée n'a rien d'évident : on pourrait intuitivement penser qu'une masse lourde subit d'avantage d'attraction qu'une masse légère ! Le principe a pourtant été établi par Galilée à partir d'une expérience de pensée, dans laquelle il faisait tomber différents objets du sommet de la tour de Pise pour constater qu'ils atterrissaient simultanément. Depuis, les expérimentateurs ont fait rouler des billes de diverses matières sur des plans inclinés, fait osciller des pendules de masses différentes mais de longueur identique, et même tenté l'expérience sur la

Lune (voir ci-dessous), ils ont toujours abouti au même constat : la gravitation agit de même pour toutes les masses.

## CHUTE LIBRE DANS L'ESPACE

La relativité générale ayant expliquer la cause profonde de ce phénomène (la courbure de l'espace-temps étant la véritable cause des phénomènes apparents de gravitation), il ne fut donc pas nécessaire de faire de test pour le valider. Or, ce principe est si profondément lié à la relativité que produire l'expérience qui le contredirait serait un formidable point de départ pour la dépasser !

D'autant que dans les théories alternatives qui se dessinent (voir p. 96), ce principe est justement violé. Des expériences de plus en

## LE TEST HISTORIQUE

Ce n'est pas une expérience déterminante scientifiquement, mais elle a marqué les esprits : en 1971, lors de la mission Apollo 15 sur la Lune, l'astronaute David Scott lâche devant une caméra (1) une plume de 30 g et un marteau de 1,320 kg. Comme prévu, dans le quasi-vide qui règne à la surface de la Lune, les deux objets réalisent leur chute de 1,60 m sans frottement et atteignent le sol lunaire simultanément.

(1) La vidéo est visible sur ce site web : [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/image/featherdrop\\_sound.mov](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/image/featherdrop_sound.mov)



plus précises se succèdent donc dans cette optique. Mais pour étudier des chutes libres de longue durée, le plus simple est... d'aller dans l'espace, par exemple pour comparer les chutes de la Lune et de la Terre dans le champ gravitationnel du Soleil. Pour cela, il suffit de mesurer la distance Terre-Lune et de vérifier qu'elle reste bien



À Des rayons laser envoyés de la Terre vers la Lune permettent de contrôler que la distance entre les deux astres reste constante, signe d'une chute à la même vitesse.

< Grâce à deux cylindres de masse différente envoyés en orbite autour de la Terre, le principe d'équivalence devrait être vérifié à  $10^{-15}$  près.

constante, en envoyant des impulsions laser sur les réflecteurs lunaires (des miroirs au sol) déposés à cet effet lors des missions habitées. Si les signaux reviennent systématiquement vers la Terre à la même vitesse, *modulo* toutes les perturbations attendues (liées par exemple aux effets de marée), alors la distance est bien restée

constante et le principe est vérifié.

Mais une autre expérience devrait apporter une précision encore supérieure. C'est celle prévue par le projet Microscope (Microsatellite à traînée compensée pour l'observation du principe d'équivalence), développé par le Cnes et l'Onera, qui doit être envoyé dans l'espace en

2016. Il s'agit, ici, de placer un système dans une enceinte hermétique sur une orbite parfaite (c'est-à-dire dont l'altitude sera très précisément corrigée en permanence), à 710 km de la Terre. Le cœur du système comprend deux cylindres creux concentriques imbriqués l'un dans l'autre, l'un en platine, l'autre en titane, ainsi qu'un autre couple témoin, constitué de deux cylindres identiques. Des accéléromètres agissent en permanence pour que les deux cylindres restent parfaitement stables et concentriques dans leur enceinte. Si la force nécessaire à ce maintien n'est pas la même pour les deux cylindres, c'est qu'ils ne chutent pas à la même vitesse. Le principe d'équivalence devrait ainsi être vérifié à  $10^{-15}$  près, soit 100 fois plus précisément que les tests menés jusqu'ici. CÉCILE BONNEAU

# 4 La mesure des variations du temps

En 2016, une horloge atomique sera placée en orbite autour de la Terre. Les chercheurs pourront alors vérifier très précisément le décalage de temps prévu par la théorie d'Einstein.

La relativité générale contient dans ses équations cet effet incroyable : le champ gravitationnel a un effet sur le temps. Une horloge placée en haut de la tour Eiffel se décalera peu à peu par rapport à une horloge similaire laissée au sol. Certes, le décalage est très subtil : une horloge située 1 km au-dessus d'une autre gagne une seconde tous les 317 000 ans ! Mais la précision des horloges atomiques est aujourd'hui telle qu'il est tout à fait possible de le constater.

Les horloges atomiques ? Il s'agit de dispositifs dans lesquels des atomes sont refroidis jusqu'à des températures extrêmes (quelques petites fractions de degré au-dessus du zéro absolu,

soit  $-273^{\circ}\text{C}$ ). Une fois dans cet état, ils sont envoyés dans une cavité sous vide pour vérifier la fréquence d'un laser. Car les atomes changent d'état (on dit qu'ils sont « excités ») sous l'action d'une lumière réglée sur une fréquence très précise, à partir de laquelle on peut mesurer le temps. L'atome de césum, par exemple, change d'état sous l'effet d'une lumière de 9 192 631 770 Hz, c'est-à-dire une onde lumineuse oscillant 9 192 631 770 fois par seconde. L'atome sert donc de contrôleur de la fréquence du laser qui, lui, donne très facilement une mesure du temps. Or, pour améliorer la précision d'une horloge atomique, il faut pouvoir « interroger » les atomes pendant le



temps le plus long possible. D'où la nécessité de les refroidir pour maîtriser leur mouvement. Sauf que lorsque les atomes sont très lents... ils ont tendance à tomber, ce qui interrompt la mesure.

## 100 FOIS PLUS PRÉCISE

C'est pour éviter ces chutes que l'idée d'envoyer une horloge atomique dans l'espace, pour s'affranchir de la gravitation, a germé il y a une vingtaine d'années. Des physiciens français du laboratoire Kastler-Brossel (à l'École normale supérieure) et du Syrte (à l'Observatoire de Paris) ont ainsi développé le projet Pharao, qui a abouti en 2014 avec la livraison du dispositif aux équipes de l'Agence spatiale européenne, chargées de l'envoyer dans l'espace en 2016.

## LE TEST HISTORIQUE

Il fallut attendre 1960 pour voir confirmer ce test crucial de la relativité générale, prévu par Einstein avant même qu'il ne finalise sa théorie. Pas question, à cette époque, de construire une horloge suffisamment précise pour montrer un décalage de temps entre deux altitudes différentes. En revanche, cet effet se traduit aussi en pratique par un décalage vers le rouge ou vers le bleu des ondes électromagnétiques. En mesurant la fréquence d'une radiation émise entre le haut et le bas d'une tour de 22,6 m, les Américains Robert Pound et Glen Rebka de l'université Harvard furent les premiers à constater cet effet.



À L'horloge ultraprecise Pharao (ici, testée au centre spatial de Toulouse) a été livrée en juillet 2014 à l'Agence spatiale européenne.

> Elle sera installée en 2017 sur la Station spatiale internationale, sur un balcon du module Columbus (le laboratoire scientifique européen).

Une horloge au césum sera ainsi installée sur la Station spatiale internationale, à 400 km d'altitude. Une horloge si précise qu'elle ne perdra que l'équivalent d'une seconde tous les... 300 millions d'années ! De quoi mesurer très précisément (100 fois plus que les meilleurs tests actuels) l'effet Einstein de décalage du temps et, bien entendu, de s'assurer qu'il correspond bien aux prédictions de la relativité générale. À moins qu'il ne révèle l'erreur tant espérée !

CÉCILE BONNEAU



# 5 La recherche des ondes gravitationnelles

Prédites par Einstein, ces déformations de l'espace-temps dues aux phénomènes les plus violents du cosmos (supernovae, trous noirs, pulsars...) demeurent indétectables.

C'est le seul test auquel la relativité générale semble résolue à ne pas se plier. Einstein avait prévu leur existence dès 1916 et elles sont traquées depuis cinquante ans, mais la chasse aux ondes gravitationnelles, pourtant très courue, reste infructueuse.

Leur existence ne fait cependant guère de doute : si un objet massif courbe la toile de l'espace-temps, son déplacement rapide doit nécessairement l'agiter. Comme la pierre jetée dans la mare, une masse en mouvement dans l'Univers y crée une série de vagueslettes. Les ondes gravitationnelles font donc vibrer l'espace-temps et se propagent à la vitesse de la lumière, modifiant brièvement

la distance entre deux objets. Simple. Mais elles se dérobent pourtant inlassablement. D'abord, parce que les ondes gravitationnelles sont de faible amplitude. Seuls les phénomènes les plus extrêmes du cosmos sont susceptibles d'en émettre de suffisamment fortes pour que l'on puisse envisager de les détecter : le big bang, les explosions en supernova, ou encore les systèmes binaires compacts, ces couples d'astres très denses (étoiles à neutrons ou trous noirs) qui orbitent très vite l'un autour de l'autre. Ensuite, parce que plus la source d'ondes gravitationnelles est lointaine, plus la puissance du signal qui nous parvient est faible. Les

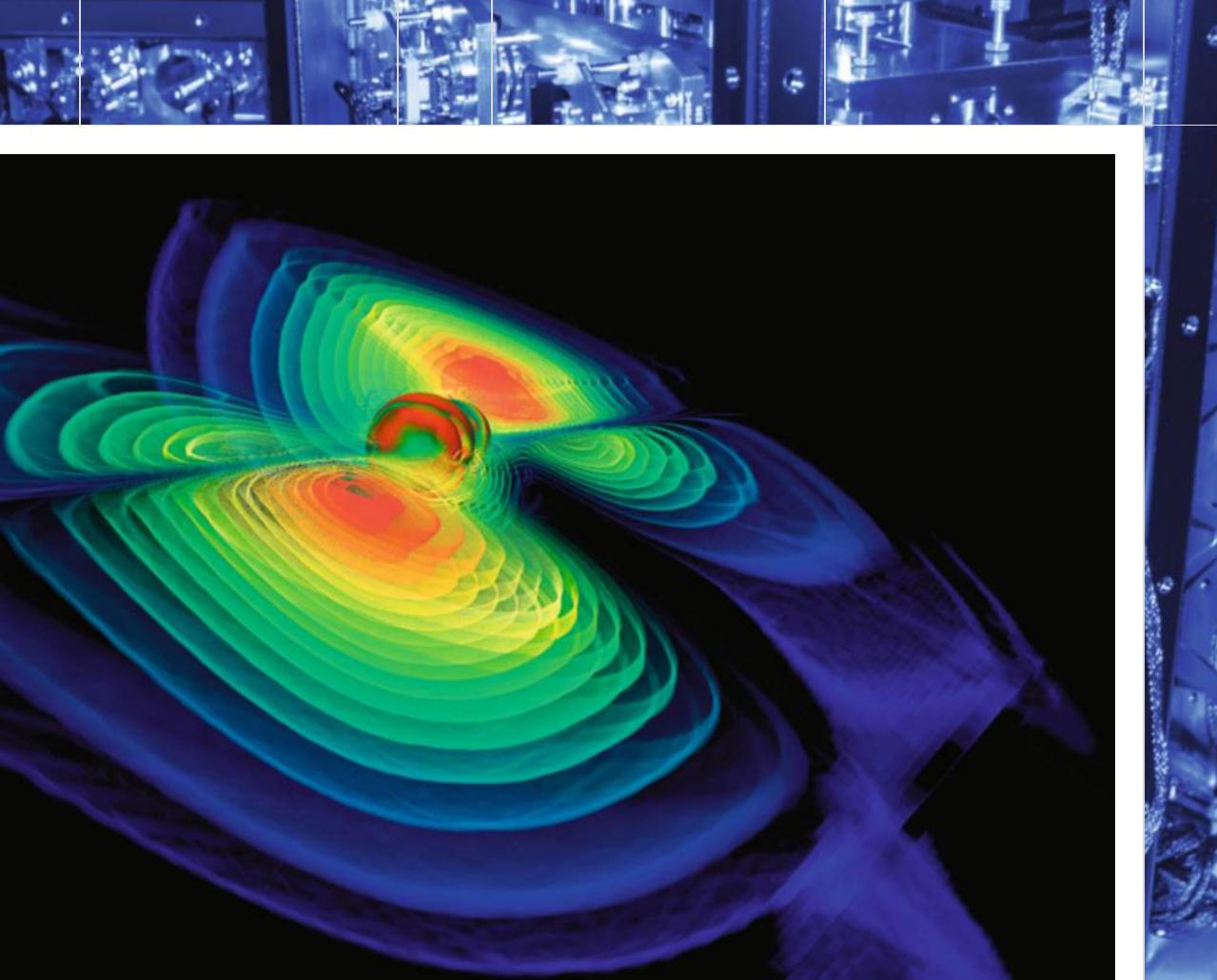


calculs montrent ainsi qu'entre deux objets terrestres séparés de un kilomètre, elles pourraient au mieux provoquer une variation de distance de  $10^{-18}$  à  $10^{-21}$  mètre, soit de l'ordre du milliardième d'atome ! Les débusquer s'avère donc éminemment complexe.

La traque a démarré au siècle dernier. Dans les années 1960, le physicien américain Joseph Weber conçoit le premier modèle de détecteur : la barre résonnante. Il s'agit d'une poutre métallique suspendue afin d'être isolée des vibrations, dont il espère percevoir l'oscillation interne, due au passage d'ondes gravitationnelles. « Toute la difficulté était alors d'estimer la force du signal émis par les différentes sources d'ondes

## LE TEST HISTORIQUE

Ce n'est qu'une preuve indirecte, mais elle est convaincante. En 1973, deux Américains, Joseph Taylor et Russell Hulse, découvrent une nouvelle espèce dans le bestiaire cosmologique : le pulsar binaire. Il s'agit de deux étoiles orbitant l'une autour de l'autre, dont l'une est un pulsar. Si ce système émet des ondes gravitationnelles, comme le prévoit la relativité générale, les deux astres doivent perdre de l'énergie, donc se rapprocher et se tourner autour de plus en plus vite. Selon les calculs théoriques appliqués au spécimen découvert, la période de rotation doit diminuer de 0,0765 millième de seconde par an. Or les observations de Taylor et Hulse coïncident avec ce résultat, ce qui leur vaut le Nobel de physique en 1993.



gravitationnelles, souligne Benoît Mours, physicien expérimental au laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules. *Or la sensibilité des barres résonnantes paraît aujourd'hui ridicule pour capter quelque chose.* »

#### UNE SENSIBILITÉ ACCRUE

Les espoirs se portent donc désormais sur un autre type de détecteur, plus grand et plus sensible : l'interféromètre. Composé de deux bras longs de plusieurs kilomètres formant un L, il tire parti d'une particularité des ondes gravitationnelles : quand elles étirent les distances dans une direction, elles les compressent dans la direction perpendiculaire. Lors du passage des ondes, l'un des bras

s'allonge donc quand l'autre rétrécit. À l'intérieur, un laser, divisé en deux faisceaux, réalise des allers-retours entre des miroirs suspendus aux extrémités de chacun des bras. À l'arrivée, le décalage entre les deux faisceaux signalerait ainsi le passage de l'onde gravitationnelle attendue.

Les trois principaux interféromètres en service aujourd'hui, les deux du projet américain Ligo, en Louisiane et dans l'État de Washington (avec des bras de 4 km), et le franco-italien Virgo, près de Pise (dont les bras mesurent 3 km), ont été construits pour détecter des phénomènes intenses : les explosions en supernova et les couples d'étoiles à neutrons en cours de fusion.

▲ La collision de deux trous noirs devrait générer des ondes gravitationnelles suffisamment fortes (comme sur cette simulation) pour être décelées depuis la Terre.

Bredouilles depuis leur mise en fonctionnement (en 2002 pour Ligo, en 2007 pour Virgo), les trois interféromètres ont fait l'objet d'améliorations. L'objectif : multiplier par 10 leur sensibilité, en réduisant le bruit parasite lié au matériel. Dotés d'une meilleure réception, ils pourront capter les signaux plus faibles de sources plus lointaines et, ainsi, « voir » plus d'émetteurs potentiels d'ondes gravitationnelles, augmentant leurs chances de les saisir. « *Quand la nuit tombe, vous voyez les étoiles que la lumière du Soleil cachait. C'est le*

V Développés pour détecter des phénomènes intenses comme les supernovae, les interféromètres (ici, l'un des tunnels de Virgo, en Italie) restent malgré tout muets.



même principe : on réduit le bruit de l'instrument pour augmenter sa portée », explique Benoît Mours, qui collabore à Virgo. Le premier, Ligo, a achevé ses travaux : rebaptisé Advanced Ligo, il a redémarré en septembre. La version perfectionnée de Virgo, quant à elle, devrait entrer en service en 2016. Les trois interféromètres à la sensibilité décuplée mèneront des campagnes de détection simultanées. La comparaison des résultats permettra ainsi d'écartier les bruits accidentels propres à l'un des instruments. Autre avantage du travail en équipe : les interféromètres étant situés à des endroits éloignés sur le globe, une même onde gravitationnelle ne les atteindra pas exactement au même moment. Et le décalage d'une fraction de seconde suffira pour localiser l'émetteur dans l'Univers ! Il

À Le radiotélescope de Nançay (Cher) guette les éventuelles perturbations des rayons émis par des pulsars millisecondes, sortes d'horloges du cosmos.

faudra toutefois patienter : le réglage minutieux des instruments exige plusieurs années.

Et si jamais ils restent muets, les spécialistes des interféromètres n'auront d'autre solution que de se tourner vers l'espace. Ils devraient en effet pouvoir compter, à partir de 2034, sur un gigantesque appareil installé en orbite : le projet eLISA de l'Agence spatiale européenne. La configuration définitive du dispositif est encore en discussion, mais ici... pas besoin de bras matérialisés ! Les faisceaux laser circuleront simplement dans le vide spatial



entre trois satellites espacés de plusieurs millions de kilomètres, dont il s'agira, là aussi, de mesurer les variations de distance.

## À L'ÉCOUTE DES PULSARS

*« eLISA sera capable de voir la totalité de l'Univers observable et de détecter des phénomènes importants, comme la collision de deux trous noirs », précise Pierre Binétruy, du laboratoire Astro-Particule et Cosmologie, à l'université Paris-Diderot, et auteur du livre *À la poursuite des ondes gravitationnelles* (Dunod). Mais le défi technique est colossal.*

## LE FAUX ESPOIR VENU DU BIG BANG

En mars 2014, la découverte avait fait sensation. À *Science & Vie* comme ailleurs : les grands quotidiens l'avaient immédiatement mise à la une, et certains spécialistes voyaient déjà ses auteurs couronnés du prochain prix Nobel ! La collaboration scientifique Bicep2, travaillant avec un télescope installé en Antarctique à quelques kilomètres du pôle Sud, avait proclamé avoir enfin démasqué des ondes gravitationnelles.

Plus exactement, les physiciens pensaient avoir observé leur trace dans une toute petite portion du fond diffus cosmologique (CMB, selon l'acronyme anglais), ce flash lumineux émis 380 000 ans après le big bang et qui livre de précieux renseignements sur les premiers instants de l'Univers. En étudiant la polarisation (la direction d'oscillation des champs électrique et magnétique) des grains de lumière composant le CMB, ils voyaient en effet des tourbillons (voir ci-dessous) qui ne pouvaient, d'après eux, qu'avoir pour origine les ondes gravitationnelles primordiales émises par le big bang. Las, pour enthousiasmante qu'elle fût, la nouvelle n'a pas résisté à des analyses plus poussées. Moins de un an plus tard, les scientifiques révélaient que la présence de poussières dans la Voie lactée avait biaisé les mesures.



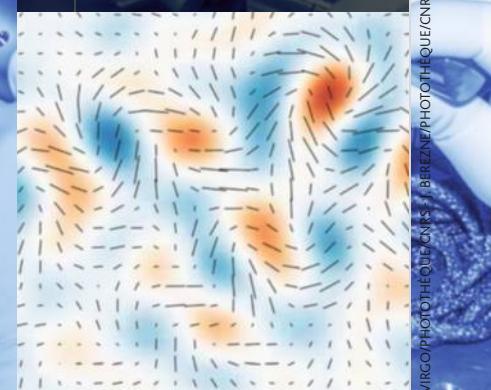
▲ L'interféromètre américain Ligo, a repris du service en septembre dernier, après des travaux d'amélioration. Plus sensible, il espère désormais capter des signaux plus faibles et plus lointains.

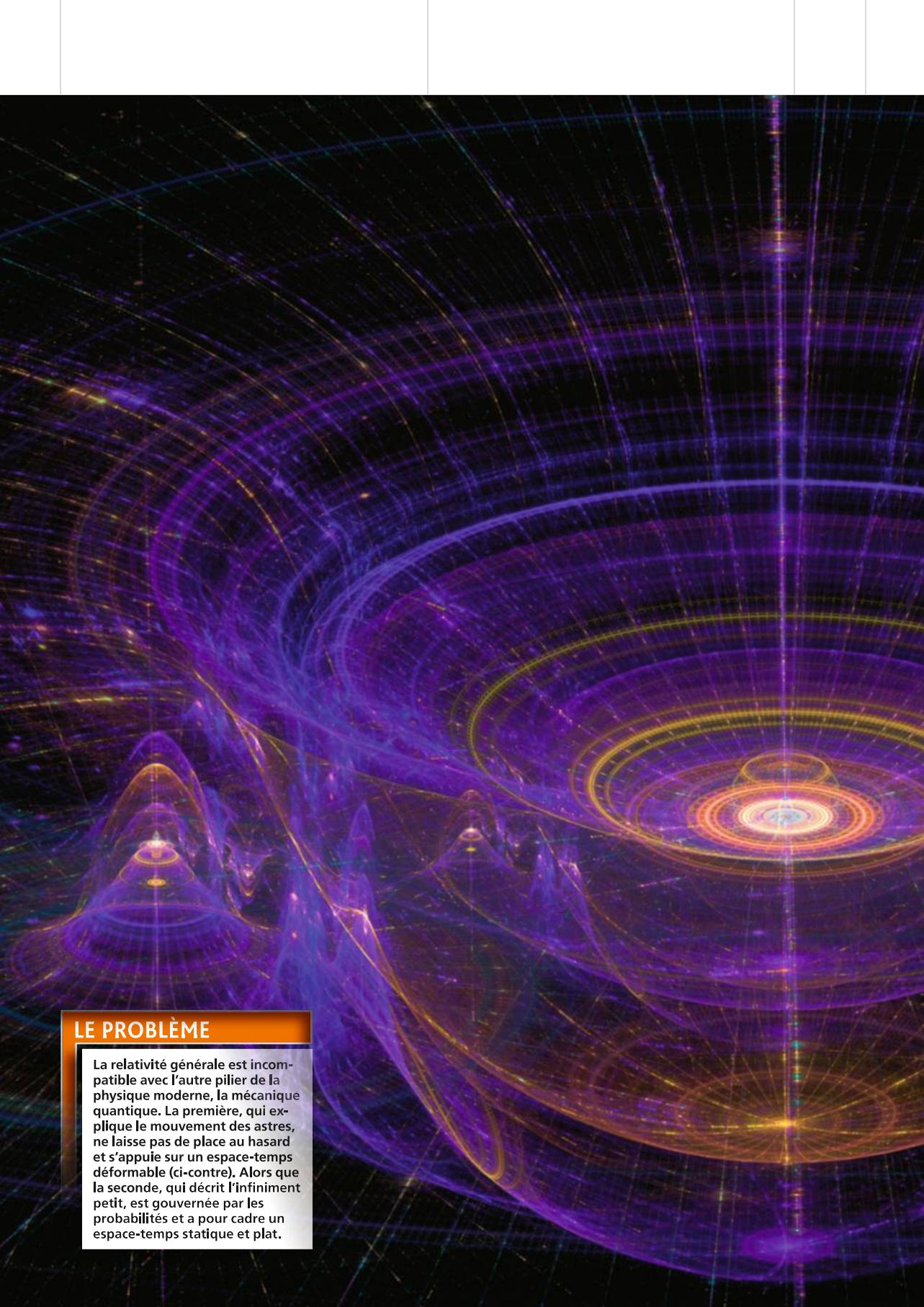
< Les ondes gravitationnelles seront aussi traquées depuis l'espace. D'ici à 2034, l'Agence spatiale européenne devrait placer en orbite trois satellites (ici, le satellite de test *Lisa Pathfinder*) voués à leur détection.

Reste une dernière méthode de détection, sous la forme d'un réseau mondial de radiotélescopes, qui écoutent une quarantaine de pulsars millisecondes. Ces derniers, découverts en 1982, émettent des impulsions radio à des intervalles très courts et très réguliers. Ces horloges cosmiques ultraprécises se situent à plusieurs milliers d'années-lumière de notre planète. Leurs « bips » jouent le même rôle que le laser des interféromètres : les ondes gravitationnelles augmentent ou diminuent la distance de leur trajet jusqu'à la Terre, ce qui crée des retards et des avances entre les bips de l'ordre de la dizaine de nanosecondes. « Nous espérons détecter les ondes gravitationnelles émises par les systèmes binaires de trous noirs qui se situent au cœur de certaines galaxies », précise Ismaël Cognard, astrophysicien au CNRS,

travaillant au radiotélescope de Nançay, dans le Cher. La tâche est ardue. « Il faut tenir compte des variations dues à la turbulence du milieu interstellaire, en raison de la présence de charges (électrons et ions), complète Gilles Theureau, astronome à l'Observatoire de Paris. De plus, les pulsars sont parfois pris de hoquets qui parasitent les mesures. Les champions de la stabilité ne sont pour le moment qu'une poignée. »

Bien sûr, l'intérêt de toutes ces expériences dépasse la confirmation de la théorie d'Einstein. Car détecter les ondes gravitationnelles promet de bouleverser notre manière d'étudier le cosmos. « L'Univers est mû par la gravitation, on l'a compris petit à petit. Or, parce que nous avons des yeux, nous l'avons observé jusque-là par le biais de la lumière, des ondes électromagnétiques. On a peut-être manqué des choses importantes. Les ondes gravitationnelles vont nous permettre de regarder l'Univers avec de nouvelles lunettes », s'enthousiasme Pierre Binétruy. Cette façon inédite de sonder l'espace et ses mystères préside de futures traques plus passionnantes encore. OLIVIER LAPROT





## LE PROBLÈME

La relativité générale est incompatible avec l'autre pilier de la physique moderne, la mécanique quantique. La première, qui explique le mouvement des astres, ne laisse pas de place au hasard et s'appuie sur un espace-temps déformable (ci-contre). Alors que la seconde, qui décrit l'infiniment petit, est gouvernée par les probabilités et a pour cadre un espace-temps statique et plat.

## THÉORIE DU TOUT

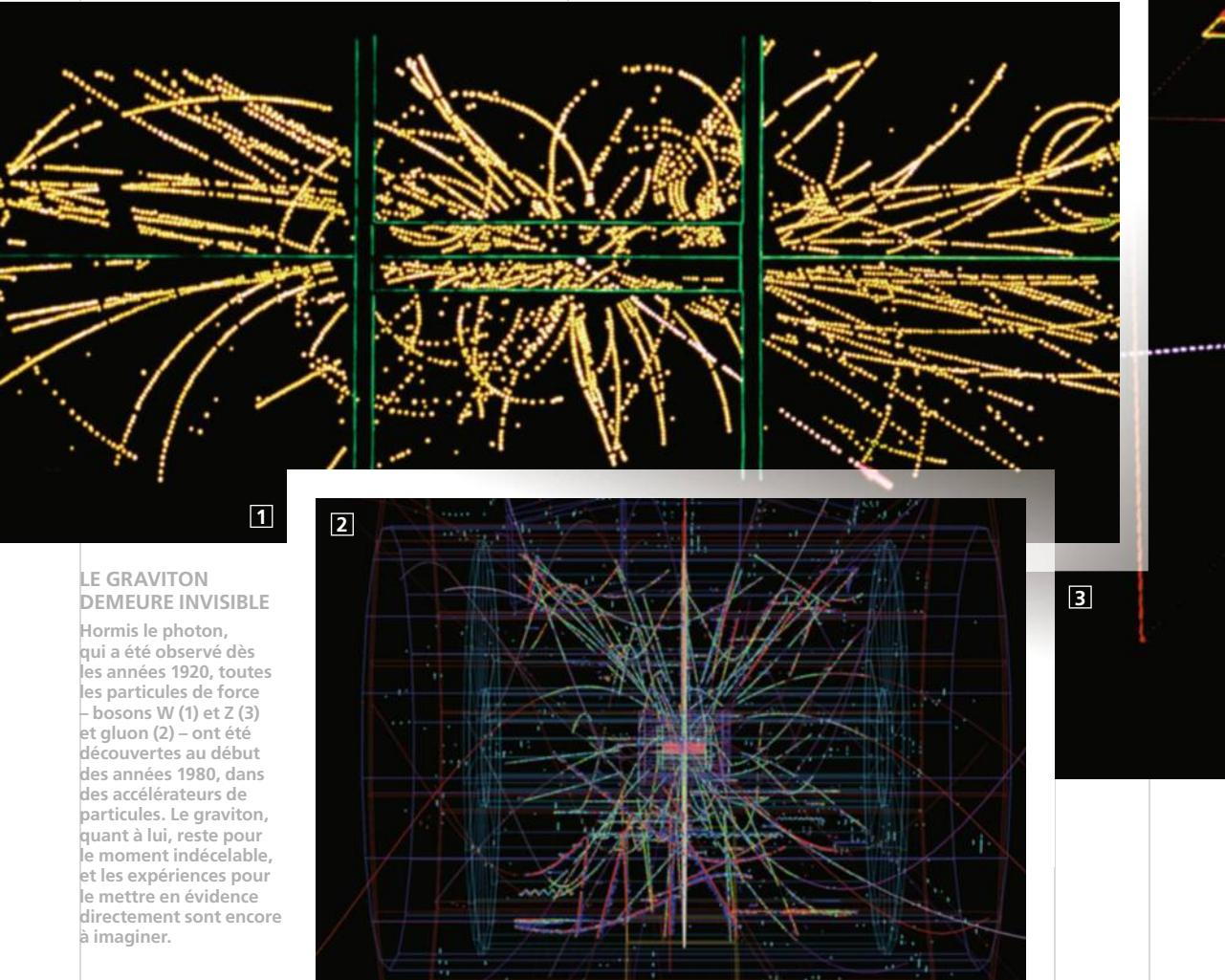
# La gravitation à l'épreuve du microscopique

Que devient la gravitation aux toutes petites échelles ? Pour répondre à la question, les physiciens tentent depuis cent ans de réunir la relativité générale et la mécanique quantique, *a priori* incompatibles. Mais aucune théorie ne se révèle encore satisfaisante.

PAR MATHIEU GROUSSON

**E**lle a ébloui par sa beauté dès sa conception, et elle résiste depuis, vaillamment, à toutes les mises à l'épreuve que les physiciens s'acharnent à lui faire subir. Pourtant, la relativité générale n'est pas une théorie définitive. Certes, « *elle est la première à donner une explication naturelle de la gravitation* », reconnaît Pierre Vanhove, du Commissariat à l'énergie atomique à Saclay et de l'Institut de hautes études scientifiques, à Bures-sur-Yvette. Contrairement à la loi de l'attraction universelle de Newton, qui n'offre qu'un accès au « comment » sans rien dire du « pourquoi », la théorie d'Einstein permet de voir la gravité comme une manifestation de la déformation que la matière imprime à la trame de l'espace-temps, ce dernier dictant en retour son mouvement à la matière. Ainsi, la pomme tombe car la Terre « creuse » l'espace-temps autour d'elle, créant comme un dénivélé gravitationnel dans laquelle la pomme n'aurait d'autre possibilité que de « rouler ». « *Pour reprendre une expression d'Einstein*,

G. HITCH



## LE GRAVITON DEMEURE INVISIBLE

Hormis le photon, qui a été observé dès les années 1920, toutes les particules de force – bosons W (1) et Z (3) et gluon (2) – ont été découvertes au début des années 1980, dans des accélérateurs de particules. Le graviton, quant à lui, reste pour le moment indécelable, et les expériences pour le mettre en évidence directement sont encore à imaginer.

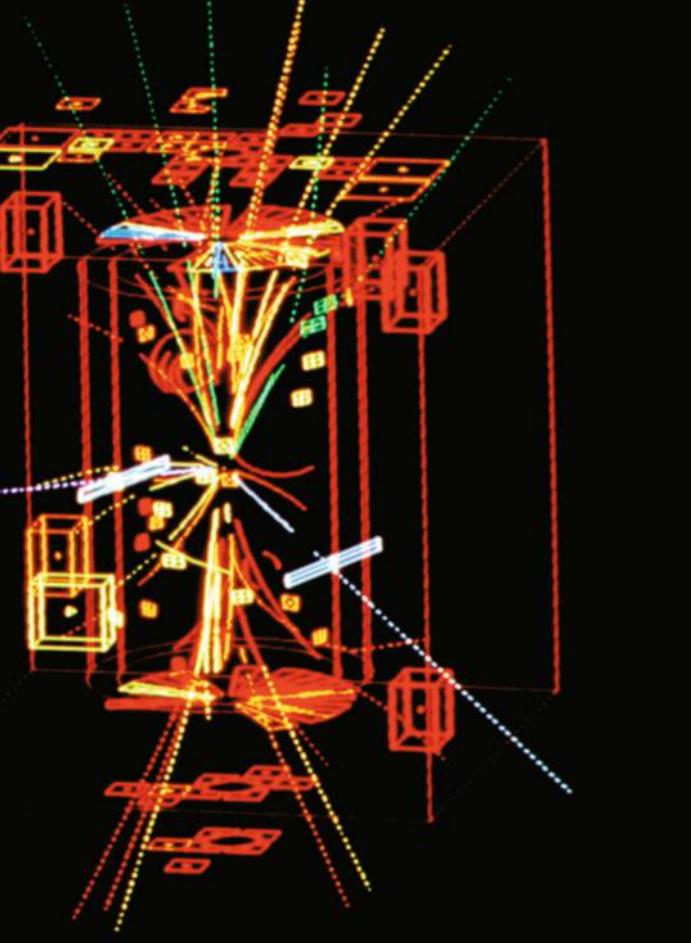
*l'espace-temps de la relativité générale est comme une sorte de mollusque dans lequel nous serions tous immersés*, commente Carlo Rovelli, du Centre de physique théorique de Luminy, à Marseille. *Loin de n'être qu'un simple cadre, il accède au statut d'objet physique capable de se courber, de s'étirer ou de se contracter.* » Autrement dit, avec la relativité générale, la force de gravitation se confond avec les mouvements de l'espace-temps hissé au rang de champ, non moins réel ou palpable que ne l'est le champ électromagnétique, par exemple.

Un champ au statut néanmoins singulier : il est celui sur lequel prennent place tous les autres phénomènes, et aux soubresauts duquel sont soumis tous les constituants de l'Univers. À l'inverse, seules les particules dotées d'une charge électrique sont sensibles aux forces électromagnétiques. Comme le résume Cédric Deffayet, de l'Institut d'astrophysique

de Paris (IAP), « *les autres interactions fondamentales se déploient dans l'espace-temps, alors que la gravitation est l'espace-temps* ». Si bien qu'Hervé Partouche, au Centre de physique théorique de l'École polytechnique, à Palaiseau, interroge : « *La relativité générale relie gravitation et propriétés de l'espace-temps, mais qu'est-ce que l'espace-temps ? Elle n'apporte aucune réponse...* »

## UNE PARTICULE ATTENDUE

Car la relativité générale laisse de côté l'analyse microscopique de ce qu'est la gravitation. Pire : la relativité générale est *a priori* incompatible avec la mécanique quantique. « *On ne comprend toujours pas bien ce qu'est la gravitation au niveau microscopique* », confirme Pierre Vanhove. Pourtant, dès 1916, Albert Einstein avait réalisé que la relativité générale impliquait l'existence d'ondes gravitationnelles dont



l'énergie, pour des raisons de cohérence avec la physique atomique, devrait être décrite dans le cadre de la mécanique quantique alors balbutiante. À la suite de quoi, entre la fin des années 1920 et le milieu des années 1970, plusieurs générations de théoriciens édifient le « modèle standard », qui décrit comment les interactions entre les particules élémentaires de matière proviennent de l'échange de particules de force. Ainsi, l'interaction électromagnétique est véhiculée par le photon, composant élémentaire des ondes électromagnétiques. L'interaction forte,

## ***La relativité générale laisse de côté l'analyse microscopique de ce qu'est la gravitation, d'où le besoin d'une nouvelle théorie***

qui assure la cohésion des quarks (constituants élémentaires des atomes), est portée par des gluons. Et enfin l'interaction faible (qui gouverne notamment les phénomènes de désintégrations radioactives) résulte de l'échange de bosons W et Z. De la même manière, il apparaît logique d'attendre une particule associée à la gravitation, le « graviton ».

Pourtant, les théoriciens doivent bien l'admettre : le cadre mathématique élaboré pour « quantifier » (au sens de rendre quantique) les trois autres

interactions est totalement inadapté à la gravitation. « La quantification de l'électromagnétisme et des interactions nucléaires fortes et faibles s'opère dans le cadre d'un espace-temps fixe. Or, dans le cas de la gravitation, qui résulte en relativité générale de la dynamique de l'espace-temps, cette approche s'est révélée totalement infructueuse », précise Carlo Rovelli. Elle conduit à des théories incohérentes.

### **DES CORDES OU DES BOUCLES?**

Au point de disqualifier le graviton ? Pas exactement. À partir des années 1970, plusieurs alternatives sont apparues pour essayer de quantifier la gravitation. À ce jour, aucune n'a conduit à une théorie entièrement satisfaisante. Pour autant, chacune d'elle conduit, sur le papier, à des structures mathématiques permettant d'envisager la présence du graviton.

C'est le cas de la théorie des cordes (voir p. 100). Il y a quelques années, des physiciens, dont Pierre Vanhove, sont parvenus à une formulation où les ondes gravitationnelles issues des mouvements de l'espace-temps s'interprètent comme des particules dont les propriétés sont exactement celles attendues pour le graviton. Une formulation qui, c'est le point primordial, permet de mener à bien des calculs précis, comme, récemment, la prédiction de la déviation de la lumière dans un champ de gravitation quantifié. « Cela donne un sens concret à cette particule cousine du photon, souligne Pierre Vanhove. Il faut la prendre au sérieux. »

Le graviton a également émergé ces dernières années des équations d'un autre modèle candidat à la quantification de la gravitation : la théorie quantique à boucles (voir p. 101), au sein de laquelle certaines propriétés de l'espace-temps suggèrent l'existence d'une telle particule.

À ceci près que, dans ces théories, le graviton n'apparaît pas comme l'ultime niveau de description de la

gravitation, mais comme un objet émergeant d'une sous-couche de la réalité encore plus fondamentale. Qu'importe. Comme le note Costas Bachas, au Laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure, à Paris, « qui sait si les expérimentateurs ne parviendront pas un jour à piéger quelques gravitons comme ils sont capables d'isoler des photons dans une cavité adaptée ». À moins que, et l'hypothèse n'est pas totalement farfelue (voir p. 102), la gravitation ne soit... qu'une illusion !

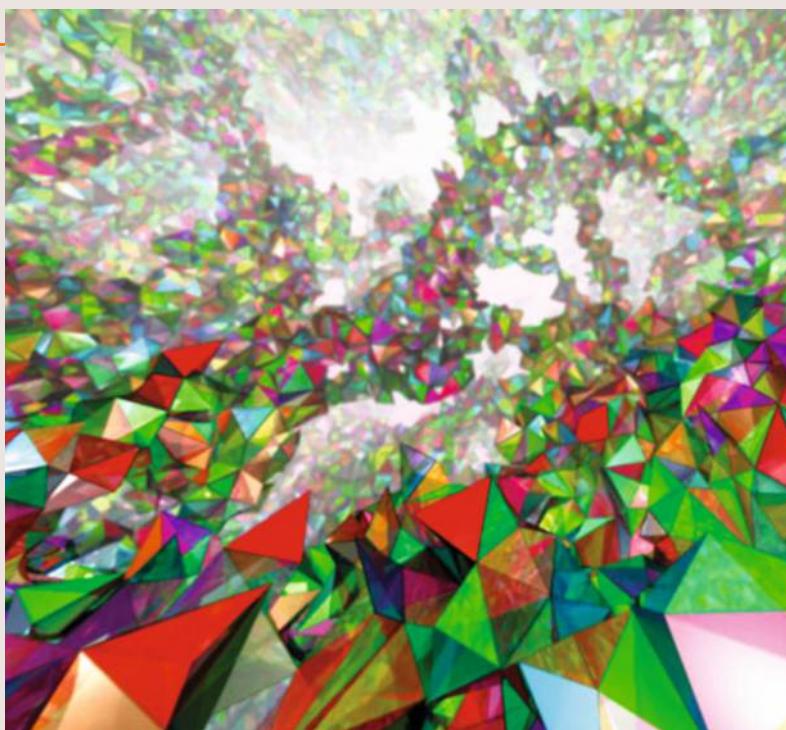
## LA GRAVITATION SELON LA THÉORIE DES CORDES

À la fin des années 1960, Gabriele Veneziano, aujourd’hui professeur au Collège de France, propose une structure mathématique qui revient à remplacer les particules, considérées jusqu’alors comme des points, par des cordes oscillant dans l’espace-temps, afin d’étudier les interactions dites fortes entre les particules. Il fonde ainsi la célèbre « théorie des cordes », qui passe inaperçue jusqu’à ce que d’autres scientifiques notent qu’elle prédit l’existence d’une particule de spin 2 (le spin d’une particule représente son mouvement de rotation sur elle-même),

la valeur attendue pour l’hypothétique graviton. Et si les cordes étaient la théorie que tout le monde espérait pour quantifier la gravitation ? Dans les années 1980, les travaux se multiplient, et une poignée de théoriciens parviennent à donner une formulation satisfaisante de cette théorie. « *Le principe consiste à plonger une corde microscopique dans un espace-temps relativiste tel qu’introduit par Einstein en 1905, et à lui appliquer les règles usuelles de la quantification afin de décrire ses propriétés* », explique Hervé Partouche, du Centre de physique théorique de l’École polytechnique. On

observe alors que les modes de vibration de la corde correspondent à des particules élémentaires comme celles rencontrées dans le modèle standard, plus le graviton. De plus, certaines conditions mathématiques auxquelles doit souscrire la corde impliquent les équations de la relativité générale. « *La force de la théorie est de pousser l’unification des forces à l’extrême en postulant que tout ce que l’on observe, y compris la gravitation, résulte d’un seul objet ultime : la corde* », résume Costas Bachas, au Laboratoire de physique théorique de l’École normale supérieure, à Paris. Le prix à payer est néanmoins un

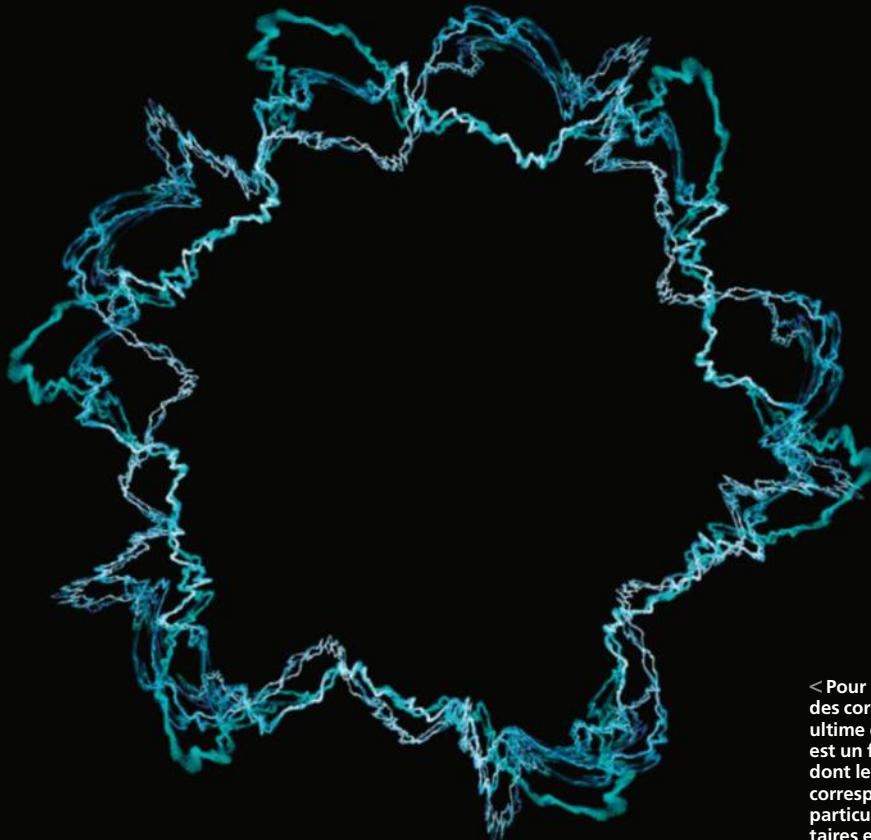
espace-temps déconcertant. En effet, cette théorie n’est cohérente mathématiquement qu’à condition de supposer que l’espace-temps compte non pas quatre dimensions (trois d’espace et une de temps), mais dix, dont six seraient invisibles car recroquevillées sur elles-mêmes. Par ailleurs, cette théorie existe en  $10^{500}$  versions différentes qui décrivent autant d’Univers possibles, sans que l’on puisse dire lequel est le nôtre. Encore spéculative, elle n’en reste pas moins la tentative la plus aboutie de réunir en une théorie unique toutes les interactions fondamentales.



## LA GRAVITATION

Comment élaborer une théorie quantique de la gravitation, alors que la mécanique quantique et la relativité générale sont mathématiquement incompatibles ? Pour Carlo Rovelli, si toutes les tentatives ont échoué jusqu’ici, c’est que « *l’erreur a été de considérer comme point de départ un espace-temps fixe, sur lequel on étudie de petites fluctuations de celui-ci.* » Or, d’après la relativité générale, la gravitation se confond avec les contractions et les ondulations de l’espace-temps. Ainsi,

*< Dans la théorie quantique à boucles, l'espace-temps est discontinu, granulaire, aux échelles ultimes.*



< Pour la théorie des cordes, l'élément ultime de la matière est un filament, dont les vibrations correspondent aux particules élémentaires et au graviton.

## DANS LA THÉORIE DES BOUCLES

selon les « boulistes », une seule solution : il faut appliquer les méthodes de quantification à l'espace-temps lui-même, considéré comme un objet mouvant. Pour y parvenir, il a fallu attendre 1986. Abhay Ashtekar, de l'université de Syracuse, aux États-Unis, propose alors une réécriture originale de la relativité générale faisant apparaître des équations qui évoquent celles décrivant les lignes de champ électrique dans la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell. De quoi exporter les méthodes utilisées pour dériver la version quantique de l'électromagnétisme dans le champ

de la relativité générale et de la gravitation. Mais ce n'est que huit ans plus tard que Carlo Rovelli et Lee Smolin, alors aux universités de Pittsburgh et de Penn State, en tirent les conséquences précises. Ainsi, selon la théorie quantique à boucles, à l'échelle microscopique, l'espace cesserait d'être lisse et continu pour faire apparaître une structure granulaire sous la forme de minuscules volumes insécables de  $10^{-105}$  mètre cube !

En 1996, Thomas Thiemann, alors à l'université de Penn State, en Pensylvanie, ajoute à cet édifice

une vision dynamique, afin de rendre compte des possibles évolutions temporelles de ces « quantas » d'espace. Il apparaît alors que l'espace-temps tout entier se comporte de façon discontinue aux échelles ultimes. Précisément, le plus petit incrément de temps imaginable en théorie quantique à boucles avoisine le temps de Planck, soit  $10^{-43}$  seconde.

« De la même manière que la mécanique quantique nous enseigne que les ondes électromagnétiques sont des nuages de particules appelées photons, la théorie quantique à boucles implique que l'espace-temps

est composé de minuscules graines liées entre elles pour faire l'espace et le temps », complète Carlo Rovelli. Cela dit, il faut attendre les dernières années pour que des physiciens prouvent le caractère unique et non-contradictoire des solutions de la théorie quantique à boucles et en donnent une formulation permettant de l'utiliser pour réaliser des calculs concrets. Offre-t-elle pour autant l'ultime vision de la gravitation ? Tout comme sa concurrente, la théorie des cordes, elle reste, à ce stade, en attente d'une confirmation observationnelle... ou d'une réfutation.

# LA GRAVITATION N'EST-ELLE QU'UNE ILLUSION?

La gravitation est une force fondamentale dont les physiciens peinent à saisir les composants ultimes... Et s'ils faisaient fausse route ? La question apparaît provocatrice, mais elle commence à être prise au sérieux par une poignée de théoriciens pour qui la gravitation pourrait bien, en définitive, n'être qu'une vaste illusion à l'échelle du cosmos tout entier. Les prémisses de ce changement radical de perspective se sont esquissées dans les années 1970. Le physicien israélien Jacob Bekenstein, décédé l'été dernier, et le cosmologiste britannique Stephen Hawking, traîvaient alors sur les trous noirs, ces monstres gravitationnels qui subtilisent à l'Univers tout ce qui passe à leur portée de manière définitive. Or ils montrent qu'en réalité, les équations qui décrivent leur horizon (la région au-delà de laquelle plus rien, pas même la lumière, ne peut échapper à leur attraction) encodent également des informations sur la matière engloutie par le trou noir. À la suite de quoi, au début des années 1990, Gerard 't Hooft, à l'université d'Utrecht, et Leonard Susskind, à l'université de Stanford, proposent le principe dit holographique. De la même manière qu'un hologramme, objet à deux dimensions, engendre une image tridimensionnelle, le principe holographique postule que la description complète

de tout système physique occupant une région de l'espace peut être donnée par une théorie définie sur la seule frontière à deux dimensions de cette région. Comme si l'on pouvait tout connaître de l'intérieur d'une maison en ne s'intéressant qu'à ses murs ! Ce n'était qu'une hypothèse. Mais, en 1997, Juan Maldacena, à l'Institut des études avancées de Princeton, démontre que dans certaines situations il y a une équivalence mathématique stricte entre une théorie des cordes décrivant la gravitation et une autre théorie définie exclusivement sur la frontière de l'espace considéré et dans laquelle il n'y a aucune trace de gravitation.

## ARTEFACT CALCULATOIRE

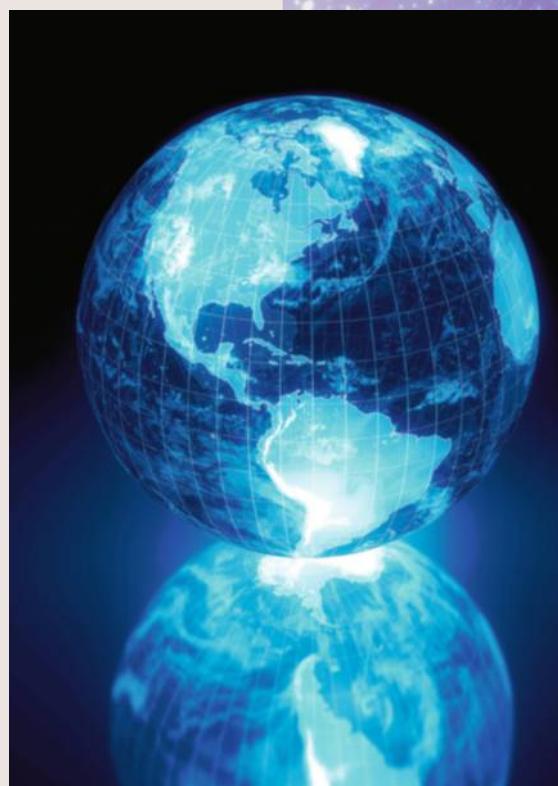
Autrement dit, rien n'interdirait alors de remplacer la théorie de la gravitation originelle par une autre, définie sur une sorte d'écran entourant l'espace considéré, et où les composants fondamentaux censés donner naissance à la gravitation seraient tout simplement absents.

*A priori*, il ne s'agit là que d'un artefact calculatoire.

« C'est un peu comme la dualité onde/corpuscule en mécanique quantique, analyse Costas Bachas, au Laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure, à Paris. Dans certaines situations, la vision corpusculaire est plus pratique pour mener à bien les calculs, alors

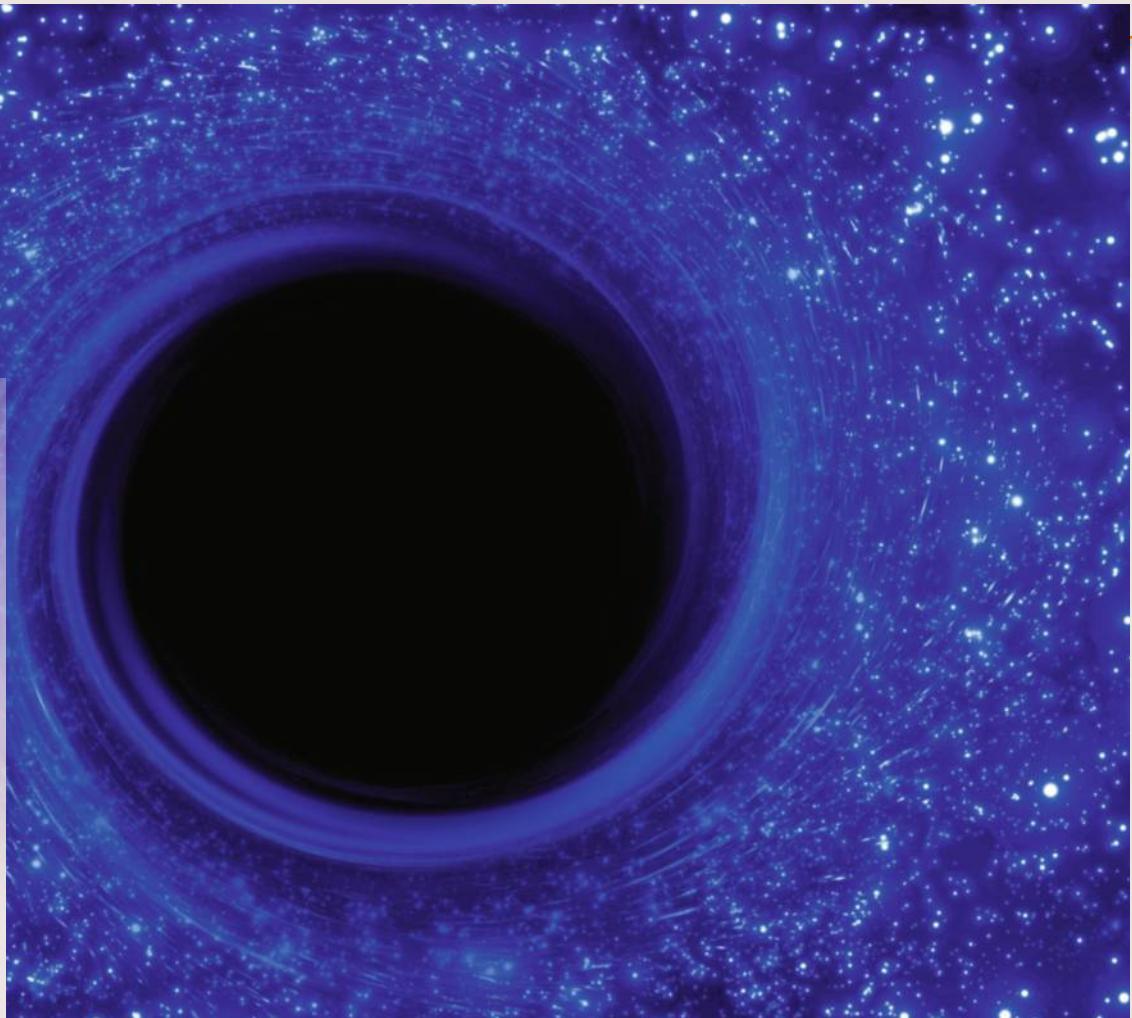
> C'est à la suite de calculs effectués sur l'horizon des trous noirs que certains physiciens ont proposé le principe dit holographique.

▼ La réalité physique que nous connaissons ne serait qu'une projection issue d'un Univers en 2D, comme l'image trompeuse d'un hologramme.



que dans d'autres, la notion d'onde est plus adaptée. » Mais qui pose la question de savoir ce qui est le plus réel : l'Univers tridimensionnel que nous semblons observer et où la gravitation est reine, ou bien sa description bidimensionnelle sans trace de la force qui fait pourtant tomber

les pommes et tourner les planètes ? L'image 3D d'un hologramme ou la plaque 2D qui contient les ingrédients qui en sont à l'origine ? « Les deux visions sont interchangeables et il est difficile de les départager », reconnaît Cédric Deffayet, de l'Institut d'astrophysique de Paris.



En 2010, Erik Verlinde, à l'Institut de physique théorique de l'université d'Amsterdam, a proposé de trancher. Selon lui, la gravitation, loin d'être une interaction fondamentale émanant d'une réalité microscopique à découvrir, ne serait qu'une pure illusion. Plus précisément, seuls devraient être considérés comme réels les objets « évoluant » sur la surface entourant le volume d'Univers dans lequel on entend étudier

la gravitation. Pure pétition de principe ? Non, car pour le physicien hollandais, de même que la force de pression au sein d'un ballon n'a d'existence qu'à notre échelle (en tant que propriété collective des atomes du gaz enfermé), mais s'évanouit dès que l'on considère l'intimité moléculaire de cette matière, il faudrait désormais interpréter la gravitation comme la manifestation macroscopique de phénomènes microscopiques ayant en réalité cours dans la version 2D de notre Univers.

Où exactement et *quid* de la réalité de cet ailleurs bidimensionnel ?

#### **NOUVELLE PERSPECTIVE**

Pour le théoricien, aucune importance. Seul compte le fait que ce qui s'y passe soit influencé par un changement de position des objets possédant une masse. En réaction à ces modifications est associée une force qui prend la forme

de ce que nous appelons gravitation dans notre Univers. Pour Costas Bachas, « ce ne sont encore que des morceaux d'idées dont on ne sait pas encore s'ils vont conduire à un renouveau de notre compréhension de la gravitation ». Mais pour Lee Smolin, à l'Institut Perimeter, au Canada, « les arguments de Verlinde élargissent la perspective ». Qui pourrait, *in fine*, conduire à considérer la force qui tient l'Univers comme une illusion...



MATIÈRE NOIRE

Où est passée  
la masse  
de l'Univers ?

## LE PROBLÈME

Le scandale est arrivé par les galaxies. En les étudiant précisément dans les années 1970, les astrophysiciens ont constaté qu'elles pesaient cinq fois plus que leur masse visible. Deux explications possibles : soit il existe une abondante matière invisible qui se plie aux lois de la gravitation, soit celles-ci (c'est-à-dire la relativité générale) sont à revoir...

Invisible, la matière noire constituerait plus de 80 % de la masse de l'Univers.

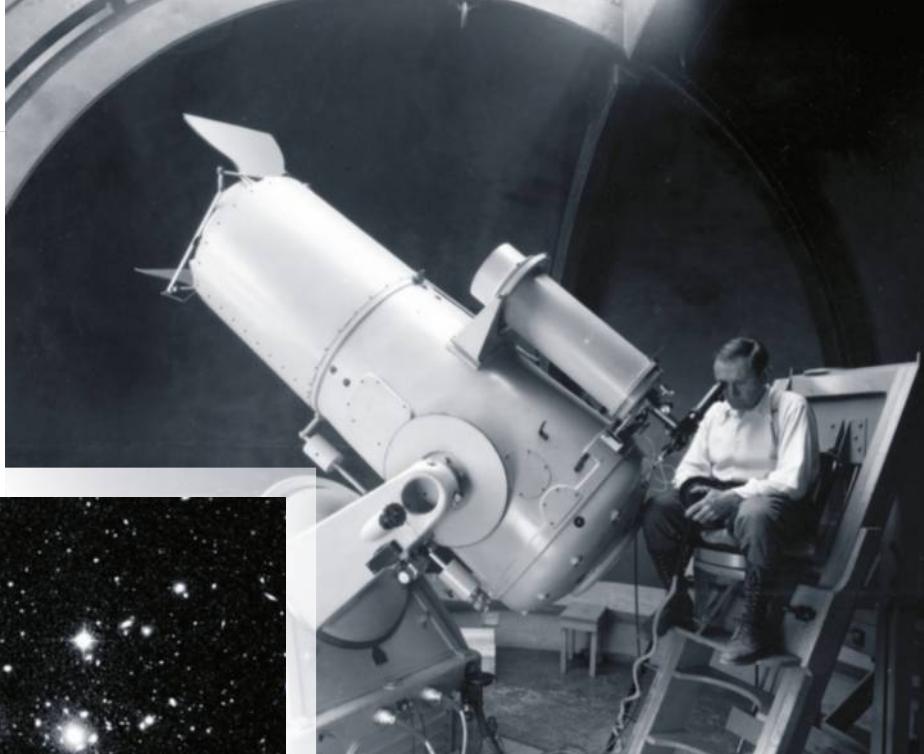
Sans elle, les galaxies se disloqueraient, faute de gravité, et la théorie de la relativité générale serait balayée. Pourtant, son existence est régulièrement remise en cause.

D'APRÈS CÉCILE BONNEAU  
ET MATHILDE FONTEZ

**L**a relativité générale décrit tellement bien le contenu et les mouvements de l'Univers, que les scientifiques se sont d'abord empressés d'ignorer le problème. Il n'a pourtant pas tardé à surgir : dès 1933, alors que la jeune et brillante théorie d'Einstein fête ses 18 printemps, l'astronome suisse Fritz Zwicky constate, en cherchant à déterminer la masse d'un amas de galaxies (l'amas de Coma, une grosse structure située à 300 millions d'années-lumière de nous), une carence flagrante. En effet, quand il mesure la vitesse des galaxies au sein de leur amas, il constate qu'elles se déplacent à 1000 km/s. Or, vu leur nombre relativement peu élevé, cette allure vertigineuse devrait, d'après la relativité générale, largement suffire à les éjecter de l'amas sans qu'elles ne se soucient d'avantage de l'attraction gravitationnelle de leurs voisines. Pourtant, elles sont maintenues en cohésion, comme liées par une force mystérieuse. Par quel phénomène ? Zwicky en est persuadé, c'est la gravitation qui est

## 1933: UNE PREMIÈRE OBSERVATION TROUBLANTE

C'est en cherchant à déterminer la masse d'un amas de galaxies (l'amas de Coma, ci-dessous), que l'astronome suisse Fritz Zwicky (ici, à l'observatoire du mont Palomar, en Californie) postule l'existence d'une masse invisible qui constraint les mouvements des astres.



à l'œuvre. Et elle est engendrée par une masse considérable, qu'il n'arrive pas à distinguer dans l'œil de son télescope bien qu'elle pèse... environ 500 fois plus que les galaxies visibles !

L'écueil sur lequel achoppe ici la relativité générale est tellement important que personne ne le prend au sérieux. Il y a forcément une erreur de calcul quelque part ! Et la communauté scientifique d'ignorer la question qui lui est posée... jusqu'à ce que l'astrophysicienne américaine Vera Rubin, de la Carnegie Institution à Washington, ne décide dans les années 1970 de s'intéresser à la vitesse de rotation

celle des étoiles du centre, à l'image de ce qui se passe par exemple à l'échelle du système solaire : Mercure, la planète la plus proche du Soleil, tourne à une vitesse 10 fois plus rapide que Neptune, la plus lointaine, conformément aux lois de Kepler en vigueur. L'étrange comportement d'Andromède suggère donc que ce qui apparaît comme une galaxie entière est en réalité seulement son cœur... Sa masse globale, elle, s'étend vraisemblablement sur un diamètre supérieur à celui que nos yeux peuvent percevoir. Bien supérieur, même : Vera Rubin estime que cette masse cachée est de 10 à 50 fois plus importante que la masse observée !

Cette fois, les physiciens ne dédaignent pas l'affaire. Ils réexaminent les amas galactiques à la lumière de leurs instruments modernes et constatent que Zwicky ne s'était pas trompé de beaucoup : on observe bien entre 100 et 300 fois moins de masse visible dans les amas que ce que les calculs de vitesse

## ***Le problème de la « masse manquante » de Zwicky devient la question de la « matière noire » pour les astrophysiciens***

d'Andromède, notre voisine galactique. Les télescopes sont alors suffisamment précis pour qu'elle puisse étudier les étoiles au cas par cas au sein de la galaxie. Or ce qu'elle voit la surprend considérablement : les étoiles tournent aussi vite au cœur du disque d'Andromède que sur ses bords, comme s'il s'agissait d'un objet solide ! Pourtant, la vitesse des étoiles périphériques devrait être bien inférieure à

laisser deviner. Le problème de la « masse manquante » de Zwicky et Rubin devient alors la question de la « matière noire » pour les astrophysiciens. C'est en effet l'unique explication possible : seule la présence d'une matière diffuse et invisible peut expliquer ces observations. Un bain de particules indétectables, que l'on ne repère que par l'effet de leur masse. La seule explication possible, vraiment ?

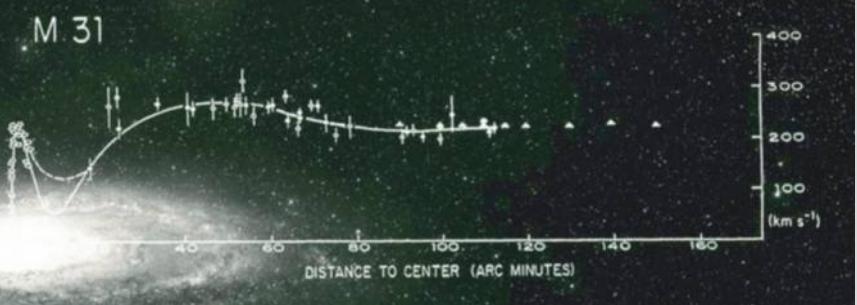


En 1983, le physicien israélien Mordehai Milgrom exprime une autre idée. Pour lui, inutile de chercher en vain d'hypothétiques particules fantômes. Mieux vaut s'attaquer... aux équations d'Einstein ! La preuve : il suffit d'admettre que la gravitation est plus forte aux petites accélérations (c'est-à-dire sur les bords des galaxies) que ne le prévoit Einstein, et on explique aussi bien les observations astronomiques qu'en invoquant la matière noire. Sa théorie de la gravitation newtonienne modifiée (Mond, selon l'acronyme anglais) voit peu à peu le jour.

### COUPS PORTÉS À LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Mais la relativité générale fait de la résistance. D'abord parce que Milgrom ne propose finalement qu'une loi empirique, rendant certes compte des observations, mais ne livrant aucune interprétation globale du cosmos alors que la relativité le fait si bien. Mais aussi parce que les observations à toutes les échelles semblent bien révéler cette matière noire dans tout l'Univers. Il devient même peu à peu possible de la cartographier précisément : elle forme des grumeaux et des filaments qui tissent une vaste toile dans l'espace, plus ou moins dense selon

ZWICKY - CALTECH ARCHIVES - CARNEGIE INST. OF WASHINGTON - V. RUBIN

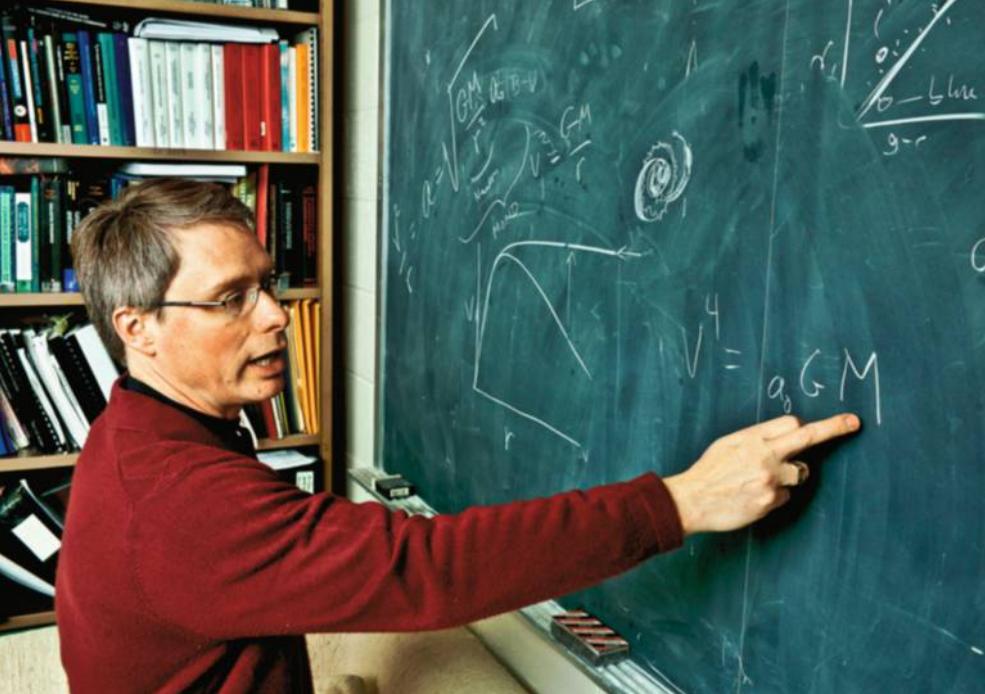


### ANNÉES 1970 : LE PROBLÈME RESSURGIT

Dans les années 1970, l'astrophysicienne Vera Rubin (à gauche) confirme l'existence d'une masse cachée en calculant la vitesse des étoiles de la galaxie Andromède (ci-dessus). L'idée de Zwicky finit par s'imposer et cette masse manquante est baptisée « matière noire ».

l'échelle à laquelle on l'observe. Majoritairement imprégnés du concept de matière noire, les astronomes sont confortés dans cette voie en 2006. Des chercheurs de l'université de l'Arizona scrutent alors l'amas du Boulet (qui est en fait une gigantesque collision entre deux gros amas) par combinaison de plusieurs techniques d'observation. En utilisant à la fois la méthode dite « des lentilles gravitationnelles » (voir p. 88) pour localiser la masse totale de l'amas, l'image optique pour localiser les masses de matière visible, et les rayons X pour localiser le nuage de gaz, les chercheurs remarquent que, dans le cas de cette collision, les masses totales des deux amas ne coïncident pas géographiquement avec leurs nuages de gaz. Comme si ces derniers étaient restés « à la traîne » après la collision, se freinant mutuellement, tandis que la matière noire, fantomatique, continuait son chemin sur sa lancée sans ralentir. La preuve éclatante de l'existence de la matière noire ! Sauf que les partisans de la gravitation modifiée eurent tôt fait de trouver une explication compatible avec leur théorie. En outre, une analyse menée par un groupe de l'université de Californie, à Davis, en mars 2012 sur un autre amas, celui d'Abel 520, semble aboutir à des conclusions inverses !

En 2011, l'astronome américain Stacy McGaugh porte un coup supplémentaire à la relativité générale. Son travail commence en fait en 1994, alors qu'il cherche en toute innocence à étudier la relation entre la luminosité des galaxies et la vitesse de rotation de leurs étoiles. Car en ce qui concerne les galaxies spirales (comme la Voie lactée ou Andromède), la



< En observant 47 galaxies, Stacy McGaugh conclut que la masse d'une galaxie semble toujours proportionnelle à la vitesse des étoiles qu'elle contient. Comme si la matière noire n'existe pas...

relation est bien connue, elle porte même le nom de « loi de Tully-Fisher ». Pour ces galaxies précisément, on pense que matière noire et matière visible sont distribuées de la même manière. On ne s'étonne donc pas de constater que la matière visible donne l'illusion de gouverner à elle seule la vitesse de rotation des étoiles. Mais Stacy McGaugh veut montrer que la loi en question ne s'applique plus quand il s'agit d'autres types de galaxies. Or, toutes les galaxies qu'il étudie semblent se plier à cette loi !

#### LA THÉORIE D'EINSTEIN VA-T-ELLE VACILLER ?

La surprise de l'astronome est totale : « C'était comme s'il n'y avait pas de matière noire, que seule l'attraction de la matière visible agissait sur les étoiles et les mettait en mouvement... mais selon des lois différentes de celles de Newton. » C'est alors que le chercheur tombe sur les travaux de Mordehai Milgrom. « Selon Mond, la gravitation sur les

scientifique ne s'alarme véritablement. En 2011, toutefois, McGaugh parvient à étudier 47 galaxies particulières, riches en gaz et très peu denses en étoiles. Dans celles-ci, la masse des étoiles est donc négligeable devant celle des gaz. Or la masse des gaz est aisée à évaluer précisément. La fiabilité des mesures pour ces galaxies est donc meilleure. Pour certains astrophysiciens, ce coup est le bon, et la théorie d'Einstein est prête à vaciller ! Reste que seules les galaxies posent ce problème, et qu'elles sont des structures encore trop mal connues pour que l'on puisse écarter la possibilité d'expliquer un jour la loi de Tully-Fisher dans le cadre de la relativité générale. Par ailleurs, aux échelles des amas de galaxies ou sur l'Univers jeune, les modèles impliquant la matière noire fonctionnent à la perfection.

Les astrophysiciens convaincus de l'existence de la matière noire restent donc majoritaires. Et selon eux, la balle est désormais dans le camp

## À l'échelle des amas de galaxies ou de l'Univers jeune, les modèles impliquant la matière noire fonctionnent parfaitement

bords des galaxies est plus forte que dans la théorie d'Einstein et cela suffit à ce que la loi de Tully-Fisher se vérifie naturellement. Milgrom avait donc décrit en quelques lignes tout ce que j'observais ! »

Le chercheur décide donc de poursuivre dans cette voie, et de reproduire ses mesures dans un grand nombre de galaxies. Pendant quinze ans, il enchaîne les observations, et toutes semblent concorder. Mais les incertitudes sur la masse des étoiles sont trop grandes pour que la communauté

des détecteurs de particules. À eux de trouver un moyen pour coincer enfin ces insaisissables particules de matière noire ! Ce n'est pas la première fois qu'ils sont ainsi défiés : ils ont réussi à détecter les neutrinos au prix de gigantesques cuves de liquide scintillant, ils sont parvenus récemment à matérialiser le boson de Higgs dans le grand collisionneur de hadrons (LHC) du Cern... Celui qui trouverait enfin la matière noire pourrait se proclamer sauveur de la relativité générale d'Einstein.

Profitez de cette offre **spéciale !**

# Abonnez-vous à Science & Vie



Dernière offre  
avant augmentation

35,90 €  
seulement  
au lieu  
de 51,60 €\*

1 an - 12 numéros

Soit  
**30%**  
de réduction

## BULLETIN D'ABONNEMENT

À compléter et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe affranchie à:  
SCIENCE & VIE - SERVICE ABONNEMENTS - CS 50273 - 27092 EVREUX CEDEX 9

**Oui, je profite de l'offre spéciale rentrée et je m'abonne à **Science & Vie** pour 1 an (12 n°) pour 35,90 € au lieu de 51,60 € soit 30% de réduction**

847 657

### > Voici mes coordonnées :

Nom : \_\_\_\_\_ Prénom : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Complément d'adresse (résidence, lieu dit, bâtiment...) : \_\_\_\_\_

Code Postal : \_\_\_\_\_ Ville : \_\_\_\_\_

Tél : \_\_\_\_\_ Grâce à votre n° de téléphone (portable) nous pourrons vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement

E-mail : \_\_\_\_\_

Je souhaite recevoir des newsletters du magazine et des offres promotionnelles des partenaires de Science & Vie (groupe Mondadori)

> **Mode de paiement :**  Chèque bancaire ou postal à l'ordre de Science & Vie

CB \_\_\_\_\_ Date et signature obligatoires

Expiré à fin \_\_\_\_\_ Code Crypto \_\_\_\_\_

Les 3 chiffres au dos de votre CB



NOUVEAU ! Recevez la version numérique OFFERTE avec votre abonnement papier !



Disponible sur  
KiosqueMag.com

\*\*Prix public et Prix de vente en kiosque. Offre valable pour un 1er abonnement livré en France métropolitaine jusqu'au 31/01/2015 et dans la limite des stocks disponibles. Je peux acquérir chacun des numéros mensuels de Science & Vie au prix de 4,30€, chacun des 4 hors-séries au prix de 4,95€ et chacune des deux éditions spéciales au prix de 5,95€. Vous ne disposez pas du droit de rétractation pour l'abonnement au magazine. Conformément à la loi informatique et libertés du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès aux données vous concernant. Il vous suffit de nous écrire en indiquant vos coordonnées. Science & Vie - TSA 10005 8 rue François Dry 92343 Montrouge cedex RCS B 372 134 773 - Capital : 1 717 369 €



## LE PROBLÈME

Ce sont les supernovæ de type Ia, dont on peut mesurer précisément la distance grâce à leur luminosité connue, qui ont révélé l'impensable: les galaxies qui les contiennent s'éloignent de nous en accélérant. Ce qui signifie que l'expansion de l'Univers est en train de s'emballer! Un constat qui nécessite d'adapter la relativité générale.

## ÉNERGIE NOIRE

# Pourquoi l'expansion s'accélère ?

Découverte en 1998, l'accélération de l'expansion de l'Univers semble réfuter la relativité générale, dans laquelle l'attraction domine. À moins qu'une force répulsive, l'énergie noire, ne soit la constante cosmologique envisagée en 1917 par Einstein...

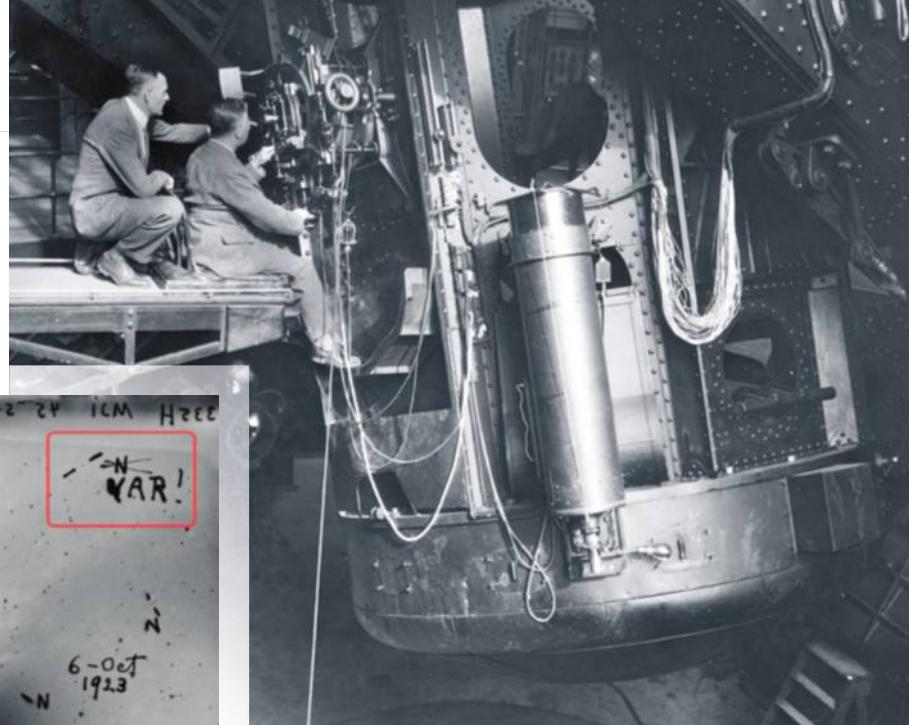
PAR MATHIEU GROUSSON

**E**n 1998, l'annonce a fait l'effet d'une bombe : l'expansion de l'Univers s'accélère. Car cette observation, confirmée depuis par des groupes indépendants via des méthodes différentes (voir encadré p. 115), présente toutes les caractéristiques du fait inconcevable. Comment imaginer, quand la gravitation est une force exclusivement attractive et de portée infinie, que l'Univers puisse continuer à croître, et ce, de plus en plus vite ? À en croire la relativité générale, il est pourtant clair que son destin ne peut être que de voir son expansion ralentir sous l'effet des forces gravitationnelles auxquelles se soumettent entre eux amas et superamas galactiques, étoiles et galaxies. Voir qu'après une longue période de croissance initiée par l'explosion initiale du big bang, l'Univers connaisse une phase de rétractation le précipitant vers un *big crunch*.

Or il n'en est rien : l'Univers est en expansion accélérée. Plus qu'un coup de canif, cette observation

### 1929 : L'EXPANSION DE L'UNIVERS EST DÉMONTRÉE

Grâce au télescope du mont Wilson, Edwin Hubble (à droite, avec James Jeans) note que toutes les galaxies semblent s'éloigner de nous à une vitesse proportionnelle à leur distance. Il en déduit que l'Univers est en expansion.



est peut-être en passe de devenir celle par laquelle, après cent ans de règne, la relativité générale devra bientôt céder sa place à une nouvelle théorie, encore à construire... À moins que par un fantastique retournement de l'histoire, elle permette à l'inverse de réhabiliter un énigmatique terme qu'Einstein avait introduit dans sa théorie en 1917 avant de se rétracter... et dont les physiciens commencent à peine à entrevoir le lien avec l'infiniment petit. La relativité générale deviendrait alors l'ultime théorie pour décrire le destin de l'Univers.

## ***Face à l'énormité du résultat, l'idée d'utiliser des supernovae pour mesurer les distances a d'abord été remise en cause***

Tout commence donc en 1998. Deux groupes internationaux, le Supernova Cosmology Project et la High-z Supernova Search, scrutent alors le ciel à la recherche de supernovae (des explosions d'étoiles) dites de type Ia dans l'Univers lointain. Celles-ci ont en effet la propriété de présenter toutes exactement la même luminosité intrinsèque. Si bien qu'une mesure de leur luminosité observée depuis

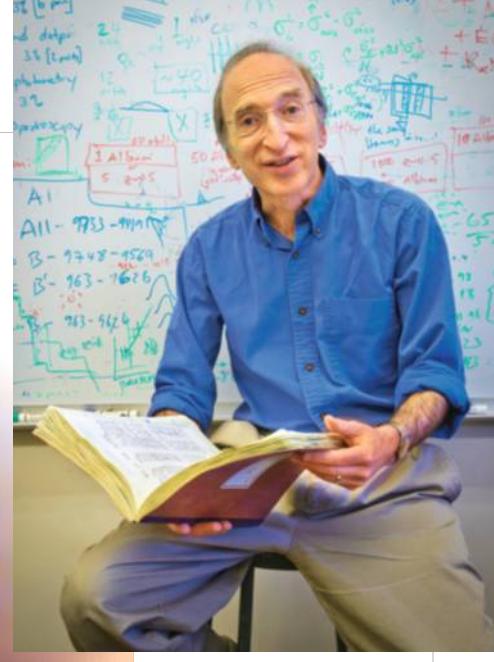
la Terre revient à déterminer la distance qui les sépare de nous : plus elles sont proches, plus elles sont brillantes. L'objectif ? Faire le lien entre cette observation et celle du « décalage vers le rouge » de ces astres.

### **L'ACCÉLÉRATION EST AUJOURD'HUI AVÉRÉE**

En effet, selon les équations de la relativité générale, plus deux objets se trouvent à des distances élevées l'un de l'autre, plus ils s'éloignent rapidement sous l'effet de l'expansion. Or, de la même manière que le son produit par un véhicule à moteur nous apparaît d'autant plus étiré vers les basses fréquences qu'il s'éloigne de nous rapidement, la lumière d'une étoile se trouve d'autant plus décalée vers le rouge qu'elle est distante de la Terre. Une propriété qui avait déjà permis dans les années 1920 de constater l'expansion de l'Univers en analysant le décalage vers le rouge des galaxies lointaines. Ainsi, avec les supernovae, les spécialistes veulent affiner les

modèles de l'expansion : ils cherchent à déterminer si cette expansion durera toujours, même en ralentissant, ou bien si elle aura une fin.

Sauf qu'au regard de l'analyse publiée par les deux équipes s'appuyant sur la luminosité intrinsèque des supernovae, il apparaît que celles-ci sont systématiquement plus éloignées de nous que ne le laissait présager leur décalage vers le rouge. Or,



### 1998 : ON CONSTATE UNE ACCÉLÉRATION

Avec deux chercheurs du High-z Supernova Search, Saul Perlmutter (ci-dessus), du Supernova Cosmology Project, a découvert l'accélération de l'expansion de l'Univers. Une déduction opérée à partir d'observations du décalage vers le rouge de supernovae lointaines. Cette avancée a valu aux trois astronomes le prix Nobel de physique en 2011.

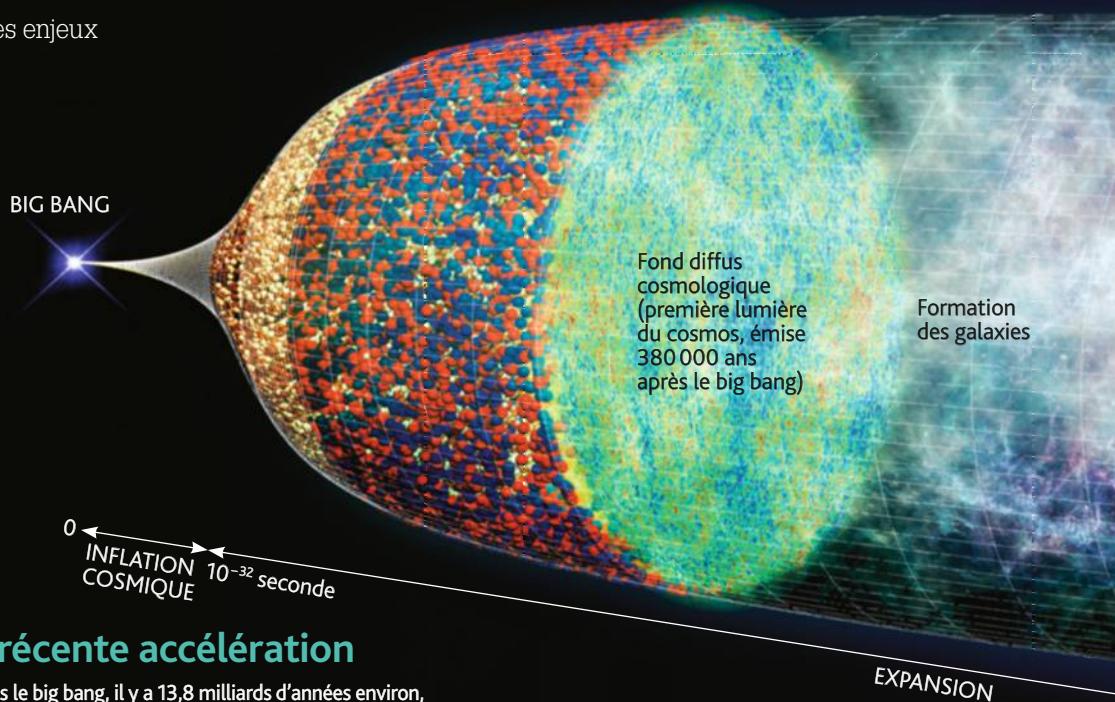
une telle distance ne peut signifier qu'une seule chose : l'expansion s'accélère depuis au moins la moitié de l'âge de l'Univers ! « Au départ, face à lénormité du résultat, la possibilité d'utiliser des supernovae de type Ia pour mesurer des distances dans l'Univers lointain a été fortement remise en cause, se souvient Pierre Binétruy, au Laboratoire astroparticule et cosmologie, à Paris. Depuis, non seulement la méthode a été affinée, mais d'autres observations ont conduit au même résultat. Si bien que l'accélération de l'expansion est aujourd'hui un fait avéré. »

Pourtant, dans un Univers où chaque grain de matière agit de manière gravitationnelle sur tous les autres selon la loi encodée dans les équations de la relativité générale, la chose semble tout simplement impossible. Plus précisément, il faudrait alors admettre que si cette loi est une approximation suffisante pour décrire la chute des pommes, le mouvement des planètes, des étoiles et des galaxies, elle achoppe sur ce qui était pourtant considéré comme le plus grand succès de la relativité générale : rendre compte de la dynamique de l'Univers

dans son ensemble. Autrement dit, les théoriciens n'auraient pas d'autre choix que d'admettre les limites de la théorie centenaire et d'en proposer une nouvelle. Pour ce faire, le plus simple est de postuler que la force de gravitation décroît bien plus vite aux distances cosmologiques qu'on le croyait, sans pour autant modifier son expression mathématique aux distances plus petites. « On peut de cette manière griffonner rapidement un modèle qui fonctionne », admet Pierre Binétruy.

### LA RELATIVITÉ EST DÉLICATE À MODIFIER

Mais pour obtenir une théorie complète, c'est une autre paire de manches. Comme l'indique le physicien, « toute modification même minimale a immédiatement des répercussions sur l'ensemble de la théorie. » Or, « les conséquences de la relativité générale ont été vérifiées avec un tel luxe de détails qu'il est très difficile d'en proposer une modification qui rende compte de l'accélération de l'expansion tout en satisfaisant à toutes les autres contraintes observationnelles », résume Philippe Brax, de l'institut de physique théorique du CEA, à Saclay.



## Une récente accélération

Juste après le big bang, il y a 13,8 milliards d'années environ, un épisode appelé inflation cosmique a subitement dilaté l'Univers de façon considérable. Cette phase s'est prolongée par l'expansion de l'Univers. Une expansion qui, comme l'ont révélés les observations de supernovae lointaines en 1998, s'est accélérée depuis environ 4 à 5 milliards d'années.

En particulier, toute modification de la loi de la gravitation implique automatiquement une violation du principe d'équivalence, pierre angulaire de la relativité générale, qui stipule que tous les corps tombent à la même vitesse dans un champ gravitationnel. Or celui-ci a, par exemple, été vérifié à  $10^{-13}$  près dans le système solaire. « Des progrès très significatifs ont été accomplis ces dernières années en vue de modifier la relativité générale, mais cela reste complexe et très délicat », conclut Pierre Binétruy.

C'est pourquoi les cosmologistes filent également une autre piste pour intégrer l'accélération de l'Univers dans leurs équations. Et de façon sur-

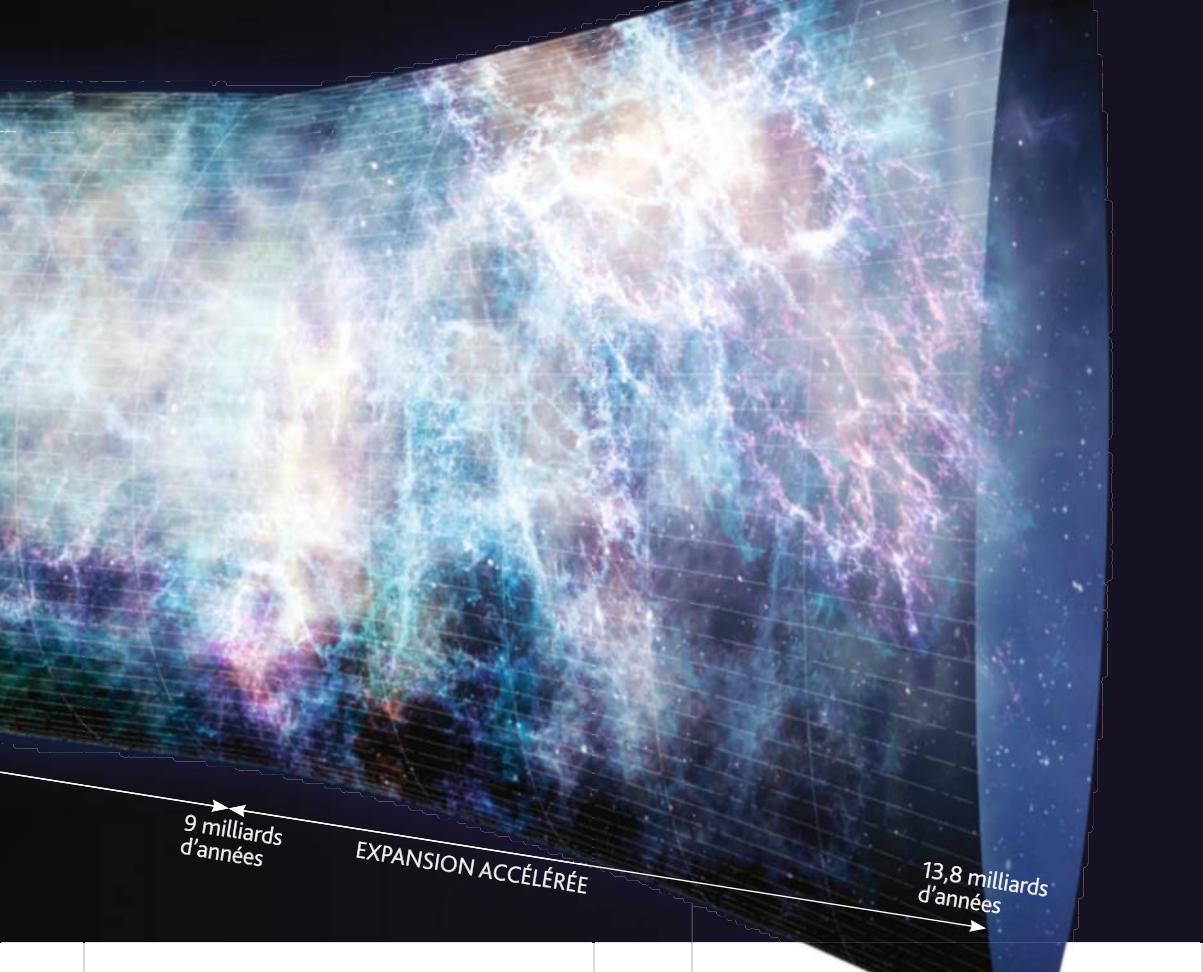
des observations qu'à la condition d'être dotée sur le papier d'une pression négative : placée dans un ballon, elle en attirerait la surface !

Le lien avec la relativité générale ? Tout simplement le fait que les solutions cosmologiques des équations de la relativité générale admettent naturellement l'ajout d'un terme dont l'interprétation physique coïncide justement avec celle de l'énergie noire. C'est si vrai que dès 1917, Albert Einstein a lui-même introduit un tel terme, alors appelé « constante cosmologique », dans ses premiers modèles d'Univers issus de la relativité générale. À l'époque, il s'agissait pour le génial physicien de

## **Les cosmologistes conçoivent une entité physique nouvelle, l'énergie noire, qui exercerait en tout point une force répulsive**

prenante, c'est au cœur même de la relativité générale qu'elle les conduit. Plutôt que de modifier la loi de l'attraction universelle, ils imaginent l'Univers rempli d'une substance qui, à l'inverse de la matière, exerce en chaque point de l'espace-temps une force répulsive. Une entité physique nouvelle, baptisée « énergie noire » avec des propriétés bien étranges, puisqu'elle ne permet de rendre compte

trouver un moyen de contrebalancer l'attraction gravitationnelle entre les corps afin de « construire » un cosmos conforme à ses visions philosophiques : statique et éternel. Las, en 1929, Edwin Hubble observe la fuite des galaxies à travers son télescope : l'Univers est manifestement en expansion. Si bien qu'en 1930, le père de la relativité générale abandonne sa constante cosmologique.



Mais depuis 1998, elle est à nouveau au premier plan ! Non pas, cette fois-ci, pour figer l'Univers, mais pour permettre, toujours contre la gravité, d'accélérer l'expansion. Cela dit, si une constante cosmologique permet de résoudre l'éénigme posée par les supernovae, en l'état, elle laisse totalement en suspens la question de la nature de l'énergie noire. Situation au combien inconfortable quand la mystérieuse entité est censée compter pour... 70 % du contenu total de l'Univers !

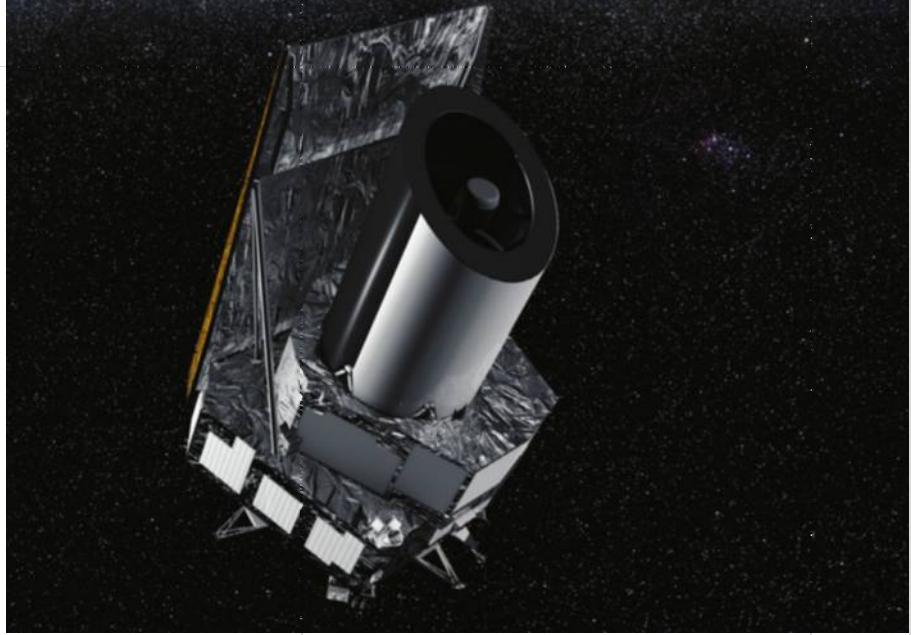
#### LE VIDE EST PLEIN D'ÉNERGIE

Pour avancer, la meilleure piste explorée actuellement nécessite de se détourner des confins du cosmos pour mieux plonger le regard dans les arcanes de l'infiniment petit. C'est en effet dans ses tréfonds que plusieurs générations de spécialistes ont fini par faire une étrange découverte : le vide est plein. Selon la mécanique quantique, théorie reine du monde microscopique, il serait en effet rempli d'une faramineuse quantité d'énergie assimilable aux soubresauts d'une nuée de particules dites virtuelles (électrons, quarks, neutrinos...) jaillissant sans discontinuer des recoins de l'espace-temps pour disparaître avant même de s'être matérialisées.

#### DES OBSERVATIONS CONCORDANTES

En 1998, l'observation de supernovae lointaines a mis les astrophysiciens sur la piste de l'accélération de l'expansion. Depuis, l'hypothèse s'est confirmée. Ainsi, l'analyse de la première lumière émise par l'Univers, 380 000 ans après le big bang, indique que la densité de l'Univers est telle que la matière ordinaire ne peut représenter que 4 % du contenu du cosmos. Le reste se partage entre une matière dite noire d'origine inconnue (25 %) et une entité mystérieuse, l'énergie noire (70 %). Par ailleurs, une série d'observations ont permis de cartographier la structure 3D de toute la matière visible et noire de l'Univers. Or, l'évolution de sa distribution implique une accélération de l'expansion. Enfin, la géométrie des structures filamentaires formées par les amas de galaxies traduit elle aussi la présence d'énergie noire dans l'Univers. Dès 2020, le satellite *Euclid* devrait cartographier plus précisément encore la matière de l'Univers. Il sera possible de dire à 1 % près si l'énergie noire se comporte comme une constante cosmologique ou si elle reflète une défaillance dans la manière dont la relativité générale décrit la gravitation.

> Le satellite *Euclid* devrait, dès 2020, aider à comprendre comment les structures galactiques et la matière noire ont évolué au cours du temps et comment elles ont été affectées par l'énergie noire.



Or, miracle de l'équation qui décrit les propriétés du vide, elle est exactement la même que celle qui décrit l'hypothétique « fluide » obscur que l'on peut formellement associer à une constante cosmologique ! Ainsi, il est possible que cette dernière ne soit autre chose que l'expression de l'énergie du vide dans les équations de la relativité générale, donnant ainsi, du même coup, corps à l'énergie noire.

### LA CONSTANTE COSMOLOGIQUE EN SURSIS

Pour être parfaitement précis, il faut ajouter que le miracle n'est pas total. Dans le cadre de la mécanique quantique, l'estimation de l'énergie du vide conduit à la valeur délirante de  $10^{12}$  joules par mètre cube d'espace, ce qui en vertu de l'équivalence entre énergie et masse reviendrait à dire que chaque volume unitaire d'Univers pèse  $10^{95}$  kilogrammes, soit l'équivalent de  $10^{54}$  galaxies ! Si tel était le cas, étant donné que, selon la relativité gé-

remarquable que la relativité générale, bien que conçue dans un cadre absolument non-quantique, contienne un terme qui, manifestement, renferme des informations, quoique déguisées, sur l'Univers microscopique ». Philippe Brax ajoute : « Interprétée de la sorte, l'accélération de l'expansion serait le premier phénomène liant irrémédiablement l'infiniment grand et l'infiniment petit. Il serait extraordinaire que, bien qu'il ait fallu des décennies pour le comprendre, la relativité générale s'en fasse l'écho depuis l'origine ! »

Pour s'en assurer, il faudra d'abord préciser la dynamique de l'accélération de l'Univers. Si les futures observations penchent en faveur d'une énergie noire dont la densité volumique a varié au cours du temps, il en serait alors fini de son interprétation comme constante cosmologique. Car, par définition, celle-ci ne peut varier. Probable alors que l'idée même que cette mystérieuse entité noire perde du crédit au

## ***L'accélération de l'expansion pourrait être le premier phénomène à lier l'infiniment grand et l'infiniment petit***

nérale toujours, toute forme d'énergie agit sur la courbure de l'espace-temps, le rayon de l'Univers ne devrait pas dépasser 30 kilomètres ! À l'inverse, la densité d'énergie noire déduite de l'expansion observée de l'Univers conduit à une valeur de  $10^{-26}$  kilogramme par mètre cube...

Ceci dit, pour la majorité des théoriciens, cette « catastrophe du vide » est avant tout un problème venu de la physique microscopique. Et, comme l'observe Pierre Binétruy, « il est absolument

profit des théories modifiant la gravitation qui autorisent la densité d'énergie associée à l'accélération de l'Univers à varier au cours du temps. La théorie d'Einstein aura alors vécu. Dans le cas inverse, la relativité générale n'en serait que confortée non seulement dans ses prédictions, mais également dans son caractère visionnaire quant à la nature même de la matière et de l'Univers. Quelle que soit la réponse, l'accélération de l'expansion de l'Univers sera bien le test ultime pour la théorie centenaire. ●

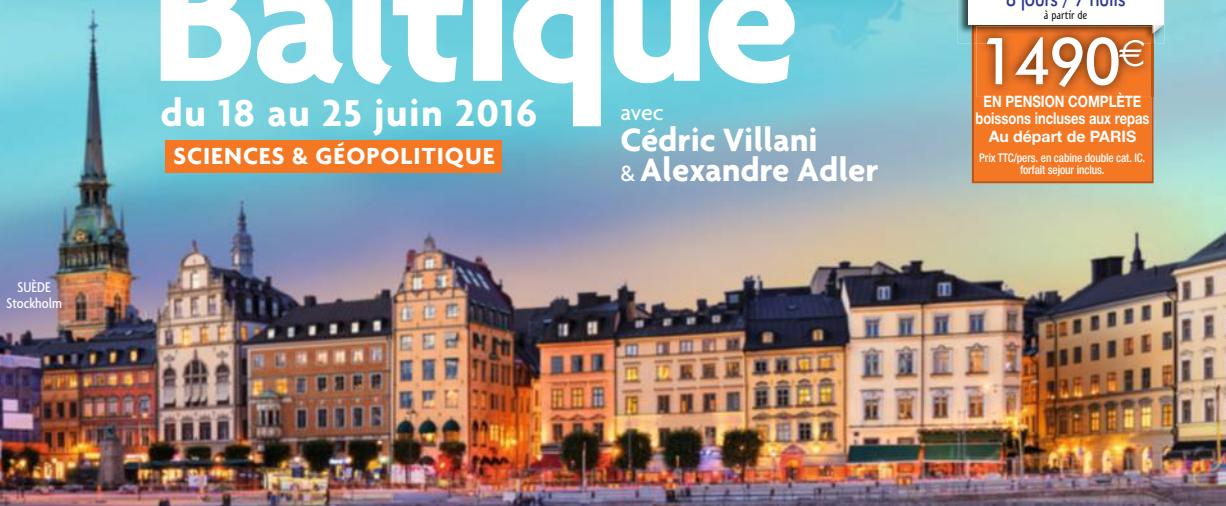


LA NOUVELLE CROISIÈRE

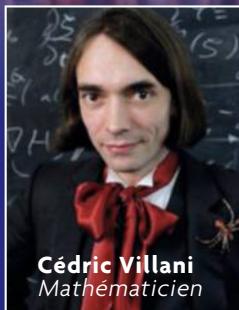
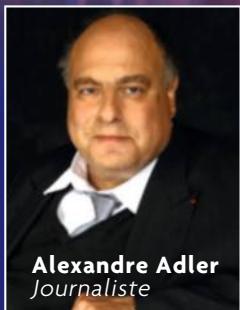
# LES CAPITALES de la Baltique

du 18 au 25 juin 2016

SCIENCES &amp; GÉOPOLITIQUE

avec  
**Cédric Villani**  
& **Alexandre Adler**8 jours / 7 nuits  
à partir de**1490€**EN PENSION COMPLÈTE  
boissons incluses aux repas  
Au départ de PARISPrix TTC/pers. en cabine double cat. IC.  
forfait séjour inclus.

EN PRÉSENCE DE :

Cédric Villani  
MathématicienAlexandre Adler  
JournalisteA BORD DU COSTA LUMINOSA  
EN PARTENARIAT AVEC

## ÉVÉNEMENT

**Les points forts de votre  
croisière Science&Vie**

- ✓ Un programme exclusif de conférences « Sciences, Géopolitique et Société ».
- ✓ Des invités prestigieux : **Cédric Villani** récompensé par la médaille Fields et **Alexandre Adler** spécialiste des relations internationales.
- ✓ Un itinéraire spectaculaire de 8 jours à la découverte des splendeurs du Nord : Saint Pétersbourg, Stockholm, Helsinki et Tallinn.

Appelez-nous !  
c'est rapide, facile  
et cela n'engage à rien.

RENSEIGNEMENTS &amp; RESERVATION AU :

**01 41 33 57 06**

Du lundi au samedi de 9h à 19h (prix d'un appel local)

EN PRÉCISANT SCIENCE&amp;VIE

OU SUR LE SITE :

[www.croisières-lecteurs.com/sv](http://www.croisières-lecteurs.com/sv)

SCIENCE&amp;VIE

Complétez, découpez et envoyez ce coupon à SCIENCE&amp;VIE CROISIÈRES - CS 50273 - 27092 EVREUX CEDEX 9

**OUI, JE SOUHAITE RECEVOIR GRATUITEMENT ET SANS ENGAGEMENT LA DOCUMENTATION  
COMPLÈTE de la croisière BALTIQUE proposée par Science&Vie.**

Mme  M Nom : ..... Prénom : .....

Adresse :

Code postal : ..... Ville : ..... Date de naissance : ..... / ..... / .....

Tél. : ..... Email : .....

Oui je souhaite bénéficier des offres de Science&Vie et de ses partenaires. Avez-vous déjà effectué une croisière (maritime ou fluviale)  OUI  NON

Conformément à la loi " Informatique et Liberté " du 6 janvier 1978, nous vous informons que les renseignements ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande et que vous disposez d'un droit d'accès, de modification, de rectification des données vous concernant. Cette croisière est organisée en partenariat avec Costa Croisières - Costa Croisière Sp.A. France - About France 092100081. Science&Vie est une publication du groupe Mondadori France Siège Social : 8 rue François Ory - 92 543 Montrouge Cedex. Crédit photo : ©iStock, ©Costa Croisières.



▲ Scott Kelly (à g.) va passer un an en orbite autour de la Terre, alors que son jumeau, Mark, est resté au sol. Au retour de Scott, lequel des deux frères sera le plus jeune ?

# DES JUMEAUX POUR TESTER L'APESANTEUR

Afin de mesurer l'effet de l'apesanteur sur le corps humain, la Nasa a choisi des jumeaux. L'un a été envoyé pour un an dans l'espace, alors que l'autre est resté sur Terre.

Une expérience qui rappelle un paradoxe de la relativité restreinte.

PAR ALEXANDRA PIHEN

**I**l y a belle lurette que les plus grands physiciens envoient des hommes dans l'espace. Et pour cause, c'est un milieu idéal pour l'expérimentation : le vide y règne et, surtout, la gravitation n'y a pas cours, une condition impossible à reproduire sur Terre ! Einstein n'a d'ailleurs pas hésité à se propulser lui-même dans le vide spatial pour chevaucher un rayon de lumière tout en s'observant dans un miroir lorsqu'il concevait sa relativité restreinte. Il a aussi envoyé des astronautes dans des ascenseurs cosmiques dont il coupait les câbles afin de les observer flotter en chute libre (voir p. 62), avant de construire la relativité générale. Mais le plus célèbre des tour-opérateurs de l'espace est sans conteste Paul Langevin qui, en 1911, a choisi comme cobayes des frères jumeaux, dont l'un restait sur Terre pendant que l'autre voyageait dans une fusée ultrarapide. Son but : révéler un paradoxe embarrassant pour la relativité restreinte : chaque jumeau pense que son frère a vieilli plus vite que lui.

## Des jumeaux pour tester l'apesanteur

Bien entendu, ces expériences ne se pratiquaient alors que dans la pensée de leurs auteurs. Et jusqu'aux années 1960, celles de la conquête spatiale, il fut impossible à tout être humain de s'affranchir de la gravité pour ressentir réellement l'apesanteur. Mais aujourd'hui, tout a changé. Quelques individus expérimentent l'apesanteur pendant plusieurs mois, et sont justement envoyés dans l'espace pour étudier les effets qu'une telle épreuve produit sur le corps ! Clin d'œil à Paul Langevin, la Nasa a même expédié, le 28 mars 2015, un de ses astronautes en mission pour un an sur la Station spatiale internationale (ISS), pendant que son frère jumeau, astronaute lui aussi, restait au sol. Même ADN, même apparence physique (à part la moustache), Scott et Mark Kelly, 51 ans, participent ainsi à une première !

### ÉTATS PHYSIOLOGIQUE ET PSYCHOLOGIQUE

Une première qui suscite l'intérêt des scientifiques. Notamment pour sa durée exceptionnelle. Car si les Russes ont déjà battu le record de longévité dans l'espace (Valeri Poliakov était resté 438 jours dans la station Mir en 1994 et 1995), les résultats de leurs expériences n'ont pas passé les frontières. Orchestrées par la Nasa, les missions One-Year et Twins Study ont la même finalité : évaluer, pendant et après une année, les états physiologique et psychologique des astronautes sous l'effet de l'apesanteur et des radiations dans un espace confiné. « Si nous voulons aller sur Mars un jour, il faut d'abord s'assurer que nous sommes capables de faire vivre des personnes dans un bidon en micropesanteur pendant trois ans », explique Sébastien Barde, responsable du Cadmos, le service des expérimentations en micropesanteur du Centre national d'études spatiales (Cnes).

Langevin a-t-il trouvé de vrais cobayes avec les jumeaux de la Nasa pour tester son paradoxe ? Oui et non. Après un an passé dans l'espace à une vitesse relative par rapport à la Terre de 27 000 km/h, Scott Kelly sera certes, au titre de la relativité restreinte,



doppler), et cela fait frémir les responsables de la santé des astronautes à la Nasa. Car au bout d'une mission de dix-huit mois, on risque de voir revenir des vieillards ! Et on ne dispose pas de solution pour contrer cet effet. »

En fait, c'est tout simplement le stress lié au confinement qui pourrait être à l'origine du trouble. « Sur une expérience de confinement de un an menée en 2010 à Moscou dans un grand bidon de 70 m<sup>2</sup>, nommée Mars 500, les cobayes ont montré exactement les mêmes transformations de la paroi artérielle, sans

## Au titre de la relativité restreinte, Scott Kelly sera plus « jeune » que son jumeau, mais ses artères auront vieilli de trente ans !

plus jeune que son frère Mark de quelques millisecondes. Mais ses parois artérielles auront vieilli de trente ans en six mois ! Car c'est là le premier effet constaté de ces vols au long cours : « Le phénomène est réversible, mais la paroi des artères s'épaissit de la même façon que lors du vieillissement, précise Philippe Arbeille, docteur en médecine spécialisé en ultrasonologie médicale (échographie,

être soumis ni à la microgravité, ni aux radiations, ni à l'exercice, ni à une nutrition particulière... Il ne reste donc aucune cause identifiée à ce jour, hormis le stress. C'est ce qui nous a beaucoup surpris au début et continue de nous surprendre ! » ajoute-t-il.

Donc oui, au bout de un an, Scott Kelly sera « plus jeune » que son frère Mark... mais dans un corps « vieux ». Un corps qui aura subi des dégradations



> Un an dans l'espace se paie cher en termes de santé. À son retour, Scott Kelly devrait avoir des artères plus épaisses, des os déminéralisés, une moins bonne vision...



◀ Pour simuler au sol l'effet de l'apesanteur sur l'organisme, il existe des dispositifs comme l'immersion sèche (à g.), pour laquelle les volontaires flottent dans un lit-baignoire, et le Bed Rest (ci-dessous), dont l'inclinaison génère un afflux plus important de sang dans la tête.



sous l'effet de la microgravité, des radiations et de l'isolement : déminéralisation des os, altération de la circulation du sang, impacts neurologiques dus à une irrigation inhabituelle du cerveau, système digestif perturbé, acuité visuelle diminuée, chromosomes endommagés... « *C'est la raison pour laquelle toute une batterie d'activités a été développée pour les astronautes. Ils doivent notamment faire au moins deux heures de sport par jour* », explique François Spiero, responsable des vols habités au Cnes.

Une autre contre-mesure (une mesure contre l'altération du corps) consiste à équiper les cuisses des astronautes de brassards pour réduire l'afflux de sang vers le cerveau. Sur ce thème, l'expérience Fluid Shift, à laquelle le Cnes participe, s'intéresse à la baisse de l'acuité visuelle. Car l'augmentation de la pression crânienne due au manque de gravité pourrait entraîner une modification du fond de l'œil. D'abord ignorée, cette hypothèse émise par

Philippe Arbeille en 1997 a été réhabilitée à la suite de l'observation, par la Nasa, d'une baisse de vision sur près de 40 % des astronautes.

### EN SITUATION DE MICROGRAVITÉ

Si certaines contre-mesures permettent de pallier les effets de l'apesanteur pendant six mois, comment les organismes réagiront-ils au bout de un an? Et *a fortiori* de trois? « *Avant de lancer des protocoles lourds, coûteux et compliqués dans l'ISS, nous réalisons des simulations au sol avec le Medes [Institut de médecine et de physiologie spatiales], filiale du Cnes où nous effectuons beaucoup de nos activités de recherche hors ISS* », explique François Spiero. Parmi ces modèles, deux simulations complémentaires, l'immersion sèche et le Bed Rest. Dans le premier cas, les sujets sont plongés dans une sorte de baignoire, mais isolés de l'eau par une toile, une situation comparable à celle de la microgravité.



▲ Fortement médiatisée (ici, les jumeaux Kelly au « Today show », un an avant le départ de Scott), l'expérience de la Nasa est controversée. Elle a, en tout cas, le mérite de rendre un certain hommage aux 100 ans de la relativité!

Technique plus classique, le Bed Rest est un modèle d'alitement en position inclinée, la tête légèrement en bas, qui permet de simuler les effets de l'apesanteur sur l'organisme. La prochaine campagne débutera en octobre 2016 sur le thème de la nutrition avec un régime particulier pour la dizaine de volontaires alités. Car des travaux franco-canadiens ont montré que les astronautes présentent des états

nouvelle génération, qui peut être piloté et paramétré à distance. « Pour mesurer les variations inférieures au millimètre des parois des grosses artères (carotides et fémorales), il nous fallait un échographe haute résolution. D'où l'intérêt de pouvoir faire manipuler l'instrument à distance par un spécialiste », explique Philippe Arbeille, à l'origine de ce nouvel outil. Encadrées par des médecins, 840 échographies ont ainsi été réalisées au sol sur des patients isolés en campagne. Un bon moyen de valider le système. Piloté depuis le Cadmos, il sera envoyé dans l'espace avec le Français Thomas Pesquet, en novembre 2016.

## L'expérience des jumeaux cherche surtout à observer l'effet des radiations cosmiques sur les chromosomes

de prédiabète. « Ils développent une augmentation de la résistance à l'insuline due à l'inactivité physique. L'insuline agit moins, d'où une tolérance moindre au glucose qui entraîne une déminéralisation osseuse et une altération du système immunitaire avec une sensibilité accrue aux infections », explique Marie-Pierre Bareille, responsable du projet Bed Rest au Medes. Pour contrer cet effet, les apports alimentaires jouent un rôle crucial. Au menu, un cocktail de plantes aux propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires couplé à du resvératrol, un polyphénol contenu dans la peau des raisins. Question cardiologie, le Cnes travaille à un échographe

Quant aux jumeaux, l'expérience cherche surtout à observer l'effet des radiations sur les télomères, ces petits bouts d'ADN aux extrémités des chromosomes. « La Nasa travaille beaucoup sur la génétique, c'est pourquoi elle a sélectionné les deux frères », estime Alain Maillet, responsable du pôle physiologie de l'ISS. Mais cette expérience est controversée. Une mission basée sur deux individus ne conduit pas à des statistiques fiables. « C'est plutôt démonstratif, relativise Philippe Arbeille. C'est insuffisant pour envisager une publication, mais l'aventure spatiale est devenue tellement banale... Il faut lui redonner du piquant. Et cela va y contribuer. » ●

france  
culture  
**C'EST  
POUR  
VOUS**

# EINSTEIN

## SEMAINE SPÉCIALE SUR FRANCE CULTURE

### DU LUNDI 21 AU VENDREDI 25 DÉCEMBRE / 14H-15H

#### CULTURE SCIENCES

LUNDI 21 DÉCEMBRE / **CONTINENT SCIENCES**  
STÉPHANE DELIGEORGES

Figure de l'univers après la découverte de la relativité générale en 1915 ?

MARDI 22 DÉCEMBRE / **RÉVOLUTIONS MÉDICALES**  
RENÉ FRYDMAN

D'Einstein à Frankenstein : les mystères du cerveau

MERCREDI 23 DÉCEMBRE / **PLANÈTE TERRE**  
SYLVAIN KAHN

Le GPS : une révolution de l'espace et du temps ?

JEUDI 24 DÉCEMBRE / **LA MARCHE DES SCIENCES**  
AURÉLIE LUNEAU

1922, Einstein à Paris !

VENDREDI 25 DÉCEMBRE / **SCIENCE PUBLIQUE**  
MICHEL ALBERGANTI

Peut-on comprendre la relativité générale ?

en partenariat avec

**SCIENCE&VIE**

[@Franceculture](http://franceculture.fr)



**INÉDIT**

A l'occasion  
des 100 ans  
de la théorie  
de la relativité

RETRouvez

# le MAG de la SCIENCE

SPÉCIAL : LES HERITIERS  
D'EINSTEIN

SAMEDI 26 DÉCEMBRE

À 18H

Présenté par  
Jérôme BONALDI

SUIVI DE

**EINSTEIN, DE L'HOMME AU GÉNIE** À 18H30

Un film documentaire réalisé par Nadège DEMANÉE

# SCIENCE&VIE TV

la chaîne pour comprendre

@ScienceetvieTV

[www.science-et-vie.tv](http://www.science-et-vie.tv)

DISPONIBLE SUR :



CANAL 94



CANAL 35



CANAL 123



CANAL 146



CANAL 162



CANAL 204



CANAL 212

