

Le Beau Livre de la
PHYSIQUE



CLIFFORD PICKOVER

Inventeur prolifique, journaliste à la tête de son propre site Internet aux millions de visiteurs, il est également l'auteur d'une quarantaine d'ouvrages de vulgarisation traduits en de nombreuses langues, sur des sujets allant des mathématiques à la religion, l'art et l'histoire. Il est aussi titulaire d'un doctorat de biochimie et biophysique obtenu à l'université de Yale et propriétaire de quarante brevets d'invention. Ses recherches ont attiré l'attention de nombreux médias, dont CNN, *Wired* et le *New York Times*.

YANN MAMBRINI

Directeur de recherche au CNRS et physicien théoricien (Université Paris-Saclay), Yann Mambirini a révisé et actualisé cette nouvelle édition française. Il est par ailleurs l'auteur, aux éditions Dunod, de l'ouvrage : *Newton à la plage : les grandes idées de la physique dans un transat*.

Clifford A. Pickover

Le Beau Livre de la PHYSIQUE

Du Big Bang à la résurrection quantique
250 découvertes qui ont changé le monde

Traduit de l'anglais (États-Unis) par
Xavier Guesnu

Nouvelle édition française actualisée par
Yann Mambrini

DUNOD

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée en anglais (États-Unis) en 2011
par Sterling Publishing Co., Inc., à New York.

Titre original : *The Physics Book. From the Big Bang to Quantum Resurrection,
250 Milestones in the History of Physics.*

© 2011 by Clifford A. Pickover

Révision scientifique de la traduction (première édition) : Julien Randon-Furling

Pour cette nouvelle édition française :

Responsable d'édition : Anne Pompon

Édition : Sarah Forveille

Fabrication : Maud Gilles

Composition : Nord Compo

Actualisation du texte : Yann Mambrini

© Dunod, 2012 pour la traduction française, 2021 pour la présente édition

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-081039-0

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

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

« Les grandes équations de la physique moderne constituent une part définitive de la connaissance scientifique et dureront peut-être plus longtemps que les premières cathédrales. »

Steven Weinberg, cité dans *It Must Be Beautiful* de Graham Farmelo

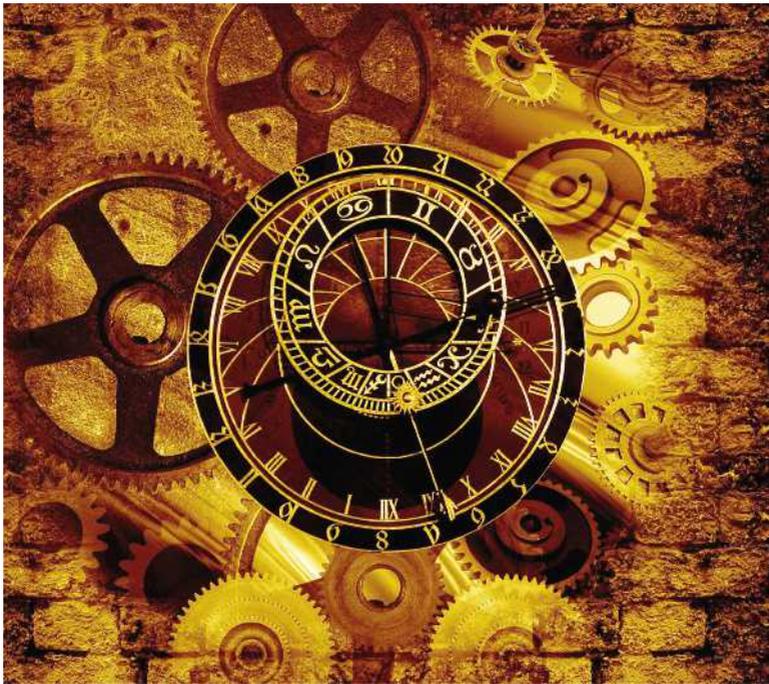


Table des matières

Introduction	10	1596 <i>Le Secret du monde</i>	70
À propos de cette nouvelle édition	15	1600 <i>De Magnete</i>	72
Remerciements	16	1608 Lunettes et télescopes	74
Il y a 13,7 milliards d'années Big Bang	18	1609 Lois de Kepler sur le mouvement des planètes	76
Il y a 3 milliards d'années Diamants noirs	20	1610 Découverte des anneaux de Saturne	78
Il y a 2 milliards d'années Réacteur nucléaire préhistorique	22	1611 Le flocon sexangulaire de Kepler	80
Il y a 30 000 ans Atlatl	24	1620 Triboluminescence	82
20 000 av. J.-C. Boomerang	26	1621 Loi de Snell-Descartes	84
3 000 av. J.-C. Cadran solaire	28	1621 Aurore boréale	86
1 850 av. J.-C. Arche	30	1638 Accélération des corps en chute libre	88
1 000 av. J.-C. Boussole olmèque	32	1643 Baromètre	90
341 av. J.-C. Arbalète	34	1644 Conservation de la quantité de mouvement	92
250 av. J.-C. Pile de Bagdad	36	1660 Loi d'élasticité de Hooke	94
250 av. J.-C. Siphon	38	1660 Générateur électrostatique de Von Guericke	96
250 av. J.-C. Principe de la poussée d'Archimède	40	1662 Loi de Boyle	98
250 av. J.-C. Vis d'Archimède	42	1669 Friction d'Amontons	100
240 av. J.-C. Mesure de la circonférence terrestre	44	1672 Mesurer le Système solaire	102
230 av. J.-C. Poulie	46	1672 Prisme de Newton	104
212 av. J.-C. Les miroirs d'Archimède	48	1673 Rampe tautochrone	106
125 av. J.-C. Machine d'Anticythère	50	1687 Lois du mouvement et de la gravitation de Newton	108
50 Éolipyle de Héron	52	1687 Newton source d'inspiration	110
50 Engrenages	54	1711 Diapason	112
78 Feu de Saint-Elme	56	1728 Vitesse de libération	114
1132 Canon	58	1738 Loi de la dynamique des fluides de Bernoulli	116
1150 Machines à mouvement perpétuel	60	1744 Bouteille de Leyde	118
1200 Trébuchet	62	1752 Cerf-volant de Franklin	120
1304 Explication de l'arc-en-ciel	64	1761 Phénomène de la goutte noire	122
1338 Sablier	66	1766 Loi des distances planétaires de Bode	124
1543 Univers héliocentrique	68		

1779 Galaxie de l'œil noir 126
 1783 Trous noirs 128
 1785 Loi électrostatique de Coulomb 130
 1787 Loi des gaz de Charles 132
 1796 Hypothèse de la nébuleuse 134
 1798 Pesée de la Terre par Cavendish 136
 1800 Pile 138
 1801 Nature ondulatoire de la lumière 140
 1803 Loi des gaz de Henry 142
 1807 Analyse de Fourier 144
 1808 Théorie atomique 146
 1811 Loi des gaz d'Avogadro 148
 1814 Raies de Fraunhofer 150
 1814 Démon de Laplace 152
 1815 Optique de Brewster 154
 1816 Stéthoscope 156
 1822 Loi de conduction de la chaleur
 de Fourier 158
 1823 Paradoxe d'Olbers 160
 1824 Effet de serre 162
 1824 Moteur de Carnot 164
 1825 Loi de l'électromagnétisme d'Ampère 166
 1826 Vagues scélérates 168
 1827 Loi d'Ohm 170
 1827 Mouvement brownien 172
 1829 Loi d'effusion de Graham 174
 1831 Lois d'induction de Faraday 176
 1834 Soliton 178
 1835 Gauss et le monopôle magnétique 180
 1838 Parallaxe stellaire 182
 1839 Pile à combustible 184
 1840 Loi de Poiseuille 186
 1840 Loi de Joule 188
 1841 Pendule 400 jours 190
 1841 Fibres optiques 192
 1842 Effet doppler 194
 1843 Conservation de l'énergie 196
 1844 Poutres en I 198
 1845 Lois de Kirchhoff 200
 1846 Découverte de Neptune 202
 1850 Deuxième loi de la thermodynamique 204
 1850 Glissance de la glace 206
 1851 Pendule de Foucault 208
 1851 Loi de la viscosité de Stokes 210
 1852 Gyroscope 212
 1852 Fluorescence de Stokes 214
 1857 Loi de Buys-Ballot 216
 1859 Théorie cinétique 218
 1861 Équations de Maxwell 220
 1864 Spectre électromagnétique 222
 1866 Tension de surface 224
 1866 Dynamite 226
 1867 Démon de Maxwell 228
 1868 Découverte de l'hélium 230
 1871 Diffusion Rayleigh 232
 1873 Radiomètre de Crookes 234
 1875 Formule de Boltzmann 236
 1878 Ampoule à incandescence 238
 1879 Plasma 240
 1879 Effet Hall 242
 1880 Effet piézoélectrique 244
 1880 Tubas de guerre 246
 1882 Galvanomètre 248
 1882 Rayon vert 250
 1887 Expérience Michelson-Morley 252
 1889 Naissance du kilogramme 254
 1889 Naissance du mètre 256
 1890 Gradiométrie gravitationnelle d'Eötvös 258
 1891 Bobine Tesla 260
 1892 Thermos 262
 1895 Rayons X 264
 1895 Loi du magnétisme de Curie 266

- 1896 Radioactivité 268
- 1897 Électron 270
- 1898 Spectromètre de masse 272
- 1900 Rayonnement du corps noir 274
- 1901 Courbe clothoïde 276
- 1903 Lumière noire 278
- 1903 Équation de la fusée de Tsiolkovsky 280
- 1904 Transformation de Lorentz 282
- 1905 Théorie de la relativité restreinte 284
- 1905 $E = mc^2$ 286
- 1905 Effet photoélectrique 288
- 1905 Alvéoles d'une balle de golf 290
- 1905 Troisième loi de la thermodynamique 292
- 1906 Tube à vide 294
- 1908 Compteur Geiger 296
- 1909 Rayonnement de freinage 298
- 1910 Rayons cosmiques 300
- 1911 Supraconductivité 302
- 1911 Noyau atomique 304
- 1911 Allée de tourbillons de Karman 306
- 1911 Chambre à brouillard de Wilson 308
- 1912 Mesurer l'univers avec les Céphéides 310
- 1912 Loi de la diffraction de Bragg 312
- 1913 Atome de Bohr 314
- 1913 Expérience de la goutte d'huile de Millikan 316
- 1915 Théorie de la relativité générale 318
- 1919 Théorie des cordes 320
- 1921 Einstein comme inspiration 322
- 1922 Expérience de Stern-Gerlach 324
- 1923 Enseignes au néon 326
- 1923 Effet Compton 328
- 1924 Relation de de Broglie 330
- 1925 Principe d'exclusion de Pauli 332
- 1926 Équation de Schrödinger 334
- 1927 Principe d'incertitude de Heisenberg 336
- 1927 Principe de complémentarité 338
- 1928 Équation de Dirac 340
- 1928 Effet tunnel en mécanique quantique 342
- 1929 Loi de l'expansion cosmique de Hubble 344
- 1929 Cyclotron 346
- 1931 Naines blanches et limite de Chandrasekhar 348
- 1931 Échelle de Jacob 350
- 1932 Neutron 352
- 1932 Antimatière 354
- 1933 Matière noire 356
- 1933 Étoiles à neutrons 358
- 1934 Rayonnement de Cherenkov 360
- 1934 Sonoluminescence 362
- 1935 Paradoxe EPR 364
- 1935 Chat de Schrödinger 366
- 1937 Superfluides 368
- 1938 Résonance magnétique nucléaire 370
- 1942 Énergie du noyau 372
- 1945 Oiseau buveur 374
- 1945 Bombe atomique *Little Boy* 376
- 1946 Nucléosynthèse stellaire 378
- 1947 Transistor 380
- 1947 Bangs supersoniques 382
- 1947 Hologramme 384
- 1948 Électrodynamique quantique 386
- 1948 Tenségrité 388
- 1948 Effet Casimir 390
- 1949 Voyage dans le temps 392
- 1949 Datation au carbone-14 394
- 1950 Paradoxe de Fermi 396
- 1954 Panneaux solaires 398
- 1955 La Tour de l'ivoire 400
- 1955 Voir l'atome seul 402
- 1955 Horloges atomiques 404
- 1956 Univers parallèles 406

1956 Neutrinos 408
 1956 Tokamak 410
 1958 Circuit intégré 412
 1959 Face cachée de la Lune 414
 1960 Sphère de Dyson 416
 1960 Laser 418
 1960 Vitesse terminale 420
 1961 Principe anthropique 422
 1961 Modèle standard 424
 1962 Impulsion électromagnétique 426
 1963 Théorie du chaos 428
 1963 Quasars 430
 1963 Lampe à lave 432
 1964 Particule de Dieu 434
 1964 Quarks 436
 1964 Violation de symétrie CP 438
 1964 Inégalités de Bell 440
 1965 Super balle 442
 1965 Fond diffus cosmologique 444
 1967 Sursauts gamma 446
 1967 Vie simulée 448
 1967 Tachyons 450
 1967 Pendule de Newton 452
 1967 Métamatériaux 454
 1969 Pièces non éclairables 456
 1971 Supersymétrie 458
 1980 Inflation cosmique 460
 1981 Ordinateurs quantiques 462
 1982 Quasicristaux 464
 1985 Théorie du Tout 466
 1985 Footballènes 468
 1987 Immortalité quantique 470
 1987 Criticalité auto-organisée 472
 1988 Trous de ver et machine à remonter le temps 474
 1990 Télescope spatial Hubble 476
 1992 Conjecture de protection chronologique 478
 1993 Téléportation quantique 480
 1993 Stephen Hawking dans *Star Trek* 482
 1995 Condensat de Bose-Einstein 484
 1995 Première exoplanète 486
 1998 Énergie sombre 488
 1999 Branes de Randall-Sundrum 490
 1999 Vitesse de la tornade la plus rapide 492
 2007 HAARP 494
 2008 Le plus noir des noirs 496
 2009 Grand collisionneur de hadrons 498
 2012 Boson de Higgs 500
 2015 Ondes gravitationnelles 502
 2019 Système international des unités 504
 2019 Première image d'un trou noir 506
 Dans 22 milliards d'années Big Rip cosmologique 508
 Dans 100 milliards d'années Isolement cosmique 510
 Dans 100 mille milliards d'années Dissipation de l'univers 512
 Au-delà de 100 mille milliards d'années Résurrection quantique 514
 Bibliographie 516
 Index 524
 Crédits photographiques 526

Introduction

De l'importance de la physique

« Avec la connaissance, le mystère s'étend. Quand les grandes théories sont abandonnées, ce que nous tenions pour certain s'effondre et le mystère est abordé différemment. Cela peut être à la fois salutaire et déconcertant, mais c'est le prix de la vérité. Les savants, les philosophes et les poètes à l'esprit créatif s'épanouissent sur ces rivages. »

– W. Mark Richardson

L'American Physical Society, principale organisation américaine de physiciens, a été fondée en 1899, quand 36 savants se réunirent à l'université Columbia et se donnèrent pour mission l'avancement et la propagation des connaissances en physique. Voici ce que dit cette société aujourd'hui :

« La physique est essentielle pour comprendre le monde autour de nous, à l'intérieur de nous, ou au-delà de nous. Elle est la science la plus élémentaire et la plus fondamentale. Elle met au défi notre imagination avec des concepts comme ceux de relativité ou de théorie des cordes, et conduit à des découvertes décisives comme les lasers et les ordinateurs, qui ont modifié nos vies. La physique englobe l'étude de l'univers, depuis les plus grandes galaxies jusqu'aux plus petites particules subatomiques. En outre, elle constitue la base de nombreuses autres sciences, comme la chimie, l'océanographie, la sismologie ou l'astronomie. »

En effet, les physiciens actuels s'aventurent dans des contrées lointaines et étudient une étonnante variété de thèmes et de lois pour comprendre l'univers et le tissu même de la réalité. Ils réfléchissent aux dimensions multiples, aux univers parallèles et aux possibilités de trous de ver reliant différentes régions de l'espace et du temps. Les découvertes des physiciens mènent souvent à de nouvelles technologies et modifient même notre regard sur le monde. Par exemple, pour de nombreux chercheurs, le principe d'incertitude de Heisenberg établit que l'univers physique n'existe pas réellement sous une forme déterminée, mais plutôt sous l'aspect d'un mystérieux ensemble de probabilités. Les progrès réalisés dans la compréhension de l'électromagnétisme ont permis l'invention de la radio, de la télévision et des ordinateurs. La thermodynamique a conduit, quant à elle, à l'invention de la voiture.

Comme vous le découvrirez au fur et à mesure de votre lecture, le champ de la physique n'a pas toujours été fixe à travers les âges, ni clairement délimité. J'ai adopté un point de vue plutôt large et inclus des sujets relatifs à l'ingénierie et à la physique appliquée,

aux avancées dans notre compréhension des objets astronomiques et même quelques rubriques quelque peu philosophiques. En dépit de cette vaste étendue, la plupart des sciences physiques ont en commun une forte dépendance à l'égard des outils mathématiques et les scientifiques s'appuient abondamment sur ceux-ci pour leurs expériences et leurs hypothèses.

Comme le dit un jour Albert Einstein, l'une des choses les plus incompréhensibles concernant l'univers est qu'il soit compréhensible. De fait, nous semblons vivre dans un cosmos qui peut être décrit ou approché par des expressions mathématiques et des lois physiques succinctes. Cependant, au-delà de la découverte de ces lois de la nature, les physiciens se trouvent souvent face aux concepts les plus profonds et les plus extraordinaires que l'humanité ait à contempler – depuis la relativité et la mécanique quantique jusqu'à la théorie des cordes et la nature du Big Bang. La mécanique quantique nous laisse entrevoir un monde si contraire à l'intuition ordinaire qu'elle soulève des questions sur les notions d'espace, de temps, d'information, de cause et d'effet. Cependant, en dépit de ses mystérieuses implications, la mécanique quantique connaît des applications dans de nombreux domaines et technologies qui incluent le laser, le transistor, le circuit intégré et l'imagerie par résonance magnétique.

Ce livre concerne aussi celles et ceux qui se trouvent derrière les grandes idées. La physique est le fondement de la science moderne et elle fascine les humains depuis des siècles. Certains des plus grands savants de l'histoire de l'humanité, tels Isaac Newton, James Clerk Maxwell, Marie Curie, Albert Einstein, Richard Feynman et Stephen Hawking, se sont consacrés à la physique et ont contribué à modifier notre perception du cosmos.

La physique figure parmi les plus difficiles des sciences. Notre description de l'univers par la physique ne cesse de croître et de s'affiner, mais nos cerveaux et nos compétences linguistiques restent fermement en place. Au fil du temps, de nouvelles physiques sont mises à jour, et de nouvelles façons de penser sont nécessaires pour les comprendre. Quand le physicien allemand Werner Heisenberg (1901–1976) s'inquiétait que les êtres humains ne puissent jamais véritablement comprendre les atomes, le physicien danois Niels Bohr (1885–1962) affichait, lui, son optimisme : « Je pense que nous le pourrons, mais nous devons pour cela apprendre ce que signifie réellement le verbe comprendre ». Aujourd'hui, nous utilisons les ordinateurs pour nous aider à raisonner au-delà des limites de notre intuition. Les expériences assistées par ordinateurs permettent même aux physiciens d'accéder à des idées et des théories dont ils n'auraient jamais rêvé avant l'omniprésence de ces machines.

Un certain nombre d'éminents physiciens pensent qu'il existe des univers parallèles au nôtre, comme les couches d'un oignon ou les bulles d'un bain moussant. Selon certaines théories, nous pourrions détecter ces univers parallèles grâce aux fuites de gravitation d'un univers à un autre adjacent. Par exemple, la lumière des étoiles éloignées peut être déformée par la gravitation d'objets invisibles d'univers parallèles situés seulement

à quelques millimètres. L'idée d'univers multiples n'est pas aussi farfelue qu'on le croit. D'après une enquête menée auprès de 72 physiciens par le chercheur américain David Raub et publiée en 1998, 58 % (Stephen Hawking inclus, comme le montre son article posthume co-publié avec Thomas Hertog en mai 2018) croient en une certaine forme de la théorie des univers multiples.

Le *Beau Livre de la physique* couvre aussi bien les sujets théoriques et éminemment pratiques que les thèmes les plus déroutants. Dans quel autre ouvrage de physique trouveriez-vous l'hypothèse de 1964 sur la particule de Dieu subatomique, placée à côté de la Super balle, qui suscita un réel engouement aux États-Unis en 1965 ? Nous rencontrerons aussi la mystérieuse énergie sombre, susceptible un jour de réduire en pièces les galaxies et de mettre fin à l'univers lors d'un terrible « Big Rip cosmique », et la loi du rayonnement des corps noirs, à l'origine de la mécanique quantique. Nous réfléchirons au paradoxe de Fermi, qui implique la communication avec la vie extraterrestre et nous méditerons sur le réacteur nucléaire préhistorique découvert en Afrique qui fonctionna durant deux milliards d'années. Nous évoquerons la course entreprise pour créer le plus noir des noirs, un noir cent fois plus foncé que celui d'une voiture noire ! Ce « noir ultime » pourra un jour servir à capturer plus efficacement l'énergie du Soleil ou concevoir des instruments optiques extrêmement sensibles.

Chaque entrée du livre est relativement brève et ne dépasse guère quelques paragraphes. Ce format permet aux lecteurs de réfléchir à un sujet, sans avoir à ingurgiter au préalable une multitude d'informations. Quand les êtres humains ont-ils aperçu pour la première fois la face cachée de la Lune ? Accédez simplement à l'entrée « Face cachée de la Lune » pour une brève présentation. Quel mystère est associé aux anciennes piles découvertes à Bagdad et que sont les diamants noirs ? Dans les pages qui suivent, nous nous attaquons à ces thèmes et à bien d'autres. Nous nous demanderons si la réalité ne se réduit pas à une construction artificielle. Maintenant que nous voilà capables de simuler des mondes complexes sur ordinateur, les scientifiques les plus sérieux s'interrogent sur la nature de la réalité. Se pourrait-il que nous vivions dans une simulation informatique ?

Dans notre propre univers, aussi petit soit-il, nous avons déjà développé des ordinateurs capables de simuler des comportements « naturels » à l'aide de logiciels et de règles mathématiques. Peut-être un jour saurons-nous créer des êtres pensants et capables de vivre dans des espaces simulés élaborés – dans des écosystèmes aussi complexes que la forêt tropicale de Madagascar. Peut-être pourrions-nous simuler la réalité elle-même et il se peut que des êtres plus avancés en soient déjà là, ailleurs dans l'univers.

Objectif et chronologie

Nous sommes entourés d'exemples auxquels s'appliquent les principes de la physique. Mon objectif, en écrivant *Le Beau Livre de la physique*, est de fournir à un large public une

présentation des concepts physiques et des physiciens majeurs sous forme d'entrées assez brèves pour être facilement assimilées. La plupart des entrées reflètent mes préférences personnelles. Certaines étapes importantes de la physique ne sont pas présentées afin que le livre ne soit pas trop volumineux. Ainsi, en célébrant les merveilles de la physique, je me suis astreint à en omettre de très belles. Néanmoins, je crois avoir inclus la majorité de celles qui ont eu une réelle importance historique et une véritable influence sur la physique, la société ou la philosophie. Certaines entrées ont un aspect pratique et même amusant, qu'il s'agisse des poulies, de la dynamite, des lasers, des circuits intégrés ou des boomerangs. À l'occasion, j'ai inclus des concepts philosophiques pour le moins étranges mais néanmoins importants, comme l'immortalité quantique, le principe anthropique ou les tachyons. Il arrive que je répète certaines informations de sorte que chaque entrée pourra être lue indépendamment. Le texte en caractère gras fait référence aux entrées associées. En outre, la section « Voir aussi » permet de relier les différentes entrées et offre au lecteur la possibilité de parcourir le livre sous forme d'une quête ludique.

Ce livre est aussi le reflet de mes propres lacunes et, même si j'essaie d'étudier autant de domaines des sciences physiques que possible, il est difficile d'en maîtriser tous les aspects. Ce livre illustre clairement mes intérêts personnels, mes atouts et mes faiblesses, et si je suis responsable du choix des entrées, je le suis aussi des erreurs et maladroites éventuelles. Plutôt qu'une présentation exhaustive ou universitaire, l'ouvrage est conçu comme une lecture récréative, aussi bien pour les étudiants en sciences ou en mathématiques que pour les non initiés. Les commentaires et suggestions destinés à l'amélioration du livre seront les bienvenus, car je considère ce projet comme un projet sans fin et qui nécessite beaucoup de passion.

Le livre est organisé de façon chronologique, une année étant associée à chaque entrée. La plupart du temps, j'ai choisi la date de la découverte d'un concept ou d'une propriété. Cependant, dans les sections « Les préparatifs » et « Tombé de rideau », j'ai retenu les dates liées à un événement réel ou supposé, tel qu'un événement cosmologique ou astronomique.

Bien sûr, dater une entrée est parfois arbitraire, par exemple quand plusieurs savants y ont contribué. J'ai souvent utilisé la date la plus proche, mais, parfois, après avoir interrogé mes collègues, j'ai opté pour la date à laquelle un concept a acquis une importance particulière. Par exemple, plusieurs dates auraient pu être attribuées à l'entrée « Trous noirs », car certains types de trous noirs ont pu se former lors du Big Bang, il y a environ 13,7 milliards d'années. Cependant, l'expression « trou noir » n'est apparue qu'en 1967, créée par le physicien John Wheeler. Finalement, j'ai choisi d'utiliser comme date celle où les savants ont formulé avec rigueur l'idée de trous noirs et de retenir ainsi l'année 1783, quand le géologue John Michell (1724–1793) évoqua le concept d'un objet si massif que la lumière ne pouvait s'en échapper. De même, j'ai retenu l'année 1933 pour la « Matière noire », car, cette année-là, l'astrophysicien suisse Fritz Zwicky (1898–1974) observa les premières preuves de l'existence possible de particules

mystérieuses et non lumineuses. L'année 1998 est accolée à « Énergie sombre », parce que ce fut non seulement l'année où l'expression a été inventée, mais aussi celle où les observations de certaines supernovas donnèrent à penser que l'expansion de l'univers s'accélérait.

Nombre des dates plus anciennes du livre, y compris celles mentionnées « av. J.-C. » ne sont qu'approximatives, comme pour la pile de Bagdad, la vis d'Archimède et autres. Au lieu de placer le terme « vers » devant toutes ces dates, je préfère préciser au lecteur que ce ne sont que des estimations ; de même pour celles indiquant un futur très éloigné.

Les lecteurs pourront remarquer qu'un nombre significatif de découvertes en physique ont conduit à l'invention d'appareils médicaux et permis ainsi de réduire la souffrance humaine et de sauver des vies. La médecine doit la plupart de ses outils d'imagerie du corps humain à la physique du xx^e siècle. Quelques semaines à peine après leur découverte en 1895, les mystérieux rayons X de Wilhelm Conrad Röntgen étaient utilisés dans les diagnostics. Des décennies plus tard, la technologie laser était la conséquence pratique de la mécanique quantique. L'échographie naquit grâce à la résolution du problème de la détection sous-marine, tandis que la scanographie tirait avantage de l'informatique. La technologie la plus récente de la médecine, utilisée pour visualiser l'intérieur du corps humain en 3 D, n'est autre que l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Les lecteurs remarqueront aussi qu'un certain nombre d'étapes majeures se sont produites au xx^e siècle. Pour placer les dates en perspective, considérons la révolution scientifique qui a eu lieu entre 1543 et 1687 environ. En 1543, Nicolas Copernic publie sa théorie héliocentrique du mouvement des planètes. Entre 1609 et 1619, Johannes Kepler établit trois lois qui décrivent les trajectoires des planètes autour du Soleil et, en 1687, Isaac Newton publie ses lois fondamentales sur le mouvement et la gravitation. Une deuxième révolution scientifique se produit entre 1850 et 1865, quand les savants introduisent et affinent divers concepts sur l'énergie et l'entropie. Des champs d'étude comme la thermodynamique, la mécanique statistique et la théorie cinétique des gaz commencent à prospérer. Au xx^e siècle, la théorie quantique, la théorie de la relativité générale et la théorie de la relativité restreinte ont considérablement modifié notre vision de la réalité.

Dans certaines entrées, les journalistes ou chercheurs scientifiques sont cités, mais pour des raisons de concision, je ne mentionne pas immédiatement la source de la citation ou les références de son auteur. Je prie celles et ceux que j'ai cités de me pardonner cette approche. Cependant, la bibliographie proposée en fin d'ouvrage permettra d'établir plus clairement l'identité de l'auteur.

Comme les entrées de ce livre sont classées par ordre chronologique, n'hésitez pas à vous reporter à l'index quand vous recherchez un concept. Par exemple, dans le cas de la mécanique quantique, pensez à consulter les entrées « Loi de radiation du corps noir », « Équation de Schrödinger », « Chat de Schrödinger », « Univers parallèles », « Condensat de Bose-Einstein », « Principe d'exclusion de Pauli » ou « Téléportation quantique ».

Qui sait ce que sera le futur de la physique ? Vers la fin du XIX^e siècle, le physicien William Thomson, connu aussi sous le nom de Lord Kelvin, proclama la fin de la physique. Il n'aurait jamais pu prévoir l'apparition de la mécanique quantique et de la relativité, ni les spectaculaires modifications qu'elles apportèrent aux sciences physiques. Dans les années 1930, le physicien Ernest Rutherford déclara à propos de l'énergie atomique : « Quiconque attendrait qu'une source de puissance naisse de la transformation des atomes se bercerait d'illusions... » En bref, il est difficile, voire impossible, de prédire l'avenir des idées et des applications de la physique.

Les découvertes en physique offrent un cadre qui permet d'explorer les mondes subatomiques et supergalactiques, et les concepts qui en découlent permettent aux chercheurs d'établir des prévisions sur l'univers. Il s'agit d'un domaine dans lequel la spéculation philosophique peut fournir une impulsion aux découvertes capitales. Aussi les découvertes présentées dans ce livre figurent-elles parmi les plus grands succès de l'humanité. À mes yeux, la physique entretient un perpétuel état d'interrogation et d'émerveillement sur les limites de la pensée, le fonctionnement de l'univers et notre place dans le vaste paysage de l'espace-temps.

À propos de cette nouvelle édition

La seconde édition française de cet ouvrage propose, avec l'accord de l'auteur, quelques nouveaux événements particulièrement marquants de l'histoire de la physique, allant de la découverte du boson de Higgs (2012) à la première image d'un trou noir (2019). D'autres événements, déjà présentés dans la première édition, ont été actualisés en fonction de développements récents parfois spectaculaires, et l'iconographie a été partiellement renouvelée.

Remerciements

Je remercie J. Clint Sprott, Leon Cohen, Dennis Gordon, Nick Hobson, Teja Krašek, Pete Barnes et Paul Moskowitz pour leurs commentaires et suggestions. Je tiens aussi à remercier tout particulièrement l'éditrice de ce livre, Melanie Madden.

Lors de mes recherches sur les grandes étapes et les moments clés de la physique, j'ai consulté un vaste ensemble d'ouvrages de référence et de sites Web, dont la plupart sont mentionnés dans la section *Bibliographie* à la fin du livre. Parmi ces références, je citerai *50 clés pour comprendre la physique* de Joanne Baker (Dunod, 2008), *The Nature of Science* de James Trefl et *The Science Book* de Peter Tallack. L'encyclopédie en ligne Wikipédia constitue par ailleurs un excellent point de départ pour les lecteurs en quête de connaissances supplémentaires.

Je me dois de souligner aussi que certains de mes précédents livres tels que *Archimedes to Hawking : Laws of Science and the Great Minds Behind Them*, m'ont fourni les informations indispensables à certaines pages relatives aux lois physiques et j'invite le lecteur à se reporter à ces ouvrages s'il souhaite plus d'informations.



« Je vais vous dire ce que fut le Big Bang, Lestat. C'est ce qui se passa quand les cellules de Dieu commencèrent à se diviser. »

Anne Rice, Le Voleur de corps (1992)

Big Bang

**Georges Lemaître (1894–1966), Edwin Hubble (1889–1953),
Fred Hoyle (1915–2001)**

Au début des années 1930, le prêtre et physicien belge Georges Lemaître proposa la théorie du Big Bang, selon laquelle l'univers aurait évolué à partir d'un état extrêmement chaud et dense. Depuis, l'espace serait en expansion permanente. Le Big Bang se serait produit il y a 13,7 milliards d'année et, aujourd'hui, la plupart des galaxies continuent à s'éloigner les unes des autres. Les galaxies ne sont pas les débris volants d'une bombe qui aurait simplement explosé. L'espace lui-même est en expansion. Les distances entre galaxies s'accroissent comme le feraient les distances séparant des pois de couleur dessinés à la surface d'un ballon qu'on gonflerait. Peu importe le pois considéré, les autres s'éloignent toujours de lui.

Les astronomes peuvent directement observer cette expansion, détectée par l'astronome américain Edwin Hubble dans les années 1920. Fred Hoyle forgea le terme Big Bang lors d'une émission de radio, en 1949. Il a fallu 380 000 ans pour que l'Univers se refroidisse suffisamment et que les électrons se combinent avec les noyaux, donnant naissance aux premiers atomes légers, essentiellement hélium, hydrogène et lithium.

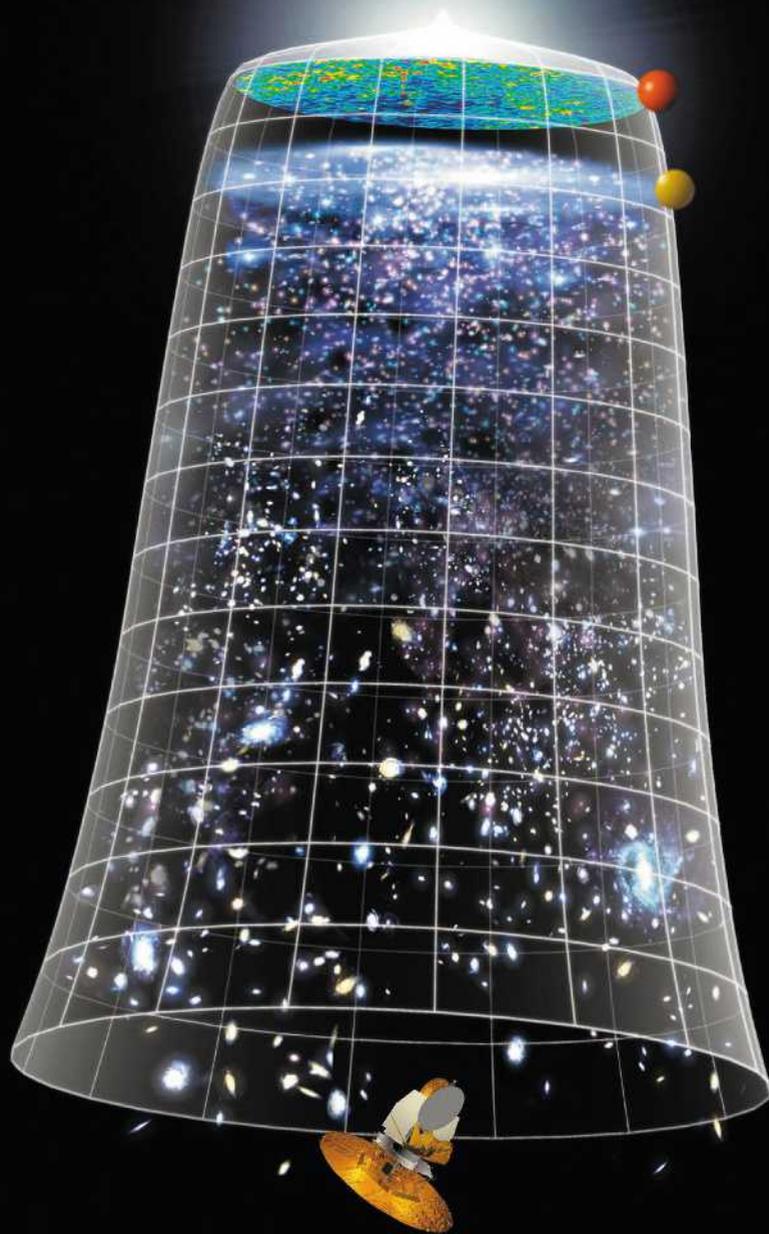


Marcus Chown suggère que, peu après le Big Bang, les masses de gaz se figèrent et que l'univers s'éclaira comme un arbre de Noël. Ces étoiles vécurent et moururent avant la naissance de notre galaxie.

L'astrophysicien Stephen Hawking a calculé que si la vitesse d'expansion de l'univers une seconde après le Big Bang avait été plus petite, ne serait-ce que d'un centième de millièème de millièème de millièème, l'univers serait retourné à son état initial et aucune vie intelligente n'aurait pu se développer.

VOIR AUSSI Paradoxe d'Olbers (1823), Loi de l'expansion cosmique de Hubble (1929), Violation de symétrie CP (1964), Fond diffus cosmologique (1965), Inflation cosmique (1980), Télescope *Hubble* (1990), Big rip cosmologique (dans 22 milliards d'années).

À GAUCHE : selon la mythologie finlandaise de la création, le Ciel et la Terre se formèrent quand un œuf d'oiseau se cassa. À DROITE : représentation artistique du Big Bang (point supérieur). Le temps se développe le long de la page. L'univers connaît une période rapide d'expansion initiale (sphère rouge) et les premières étoiles apparaissent il y a 400 millions d'années (sphère jaune).



Diamants noirs

Depuis longtemps, les scientifiques savent que des diamants sont présents dans le ciel. L'espace extra-atmosphérique pourrait aussi être le lieu de naissance de mystérieux diamants noirs, appelés carbonados.

Il existe diverses théories sur la formation de ces diamants, comme celle des impacts de météorites qui provoqueraient les pressions extrêmes nécessaires à la création des diamants (via un processus appelé métamorphisme d'impact). En 2006, Stephen Haggerty et Jozsef Garai, lors d'études sur la porosité des carbonados, signalèrent la présence de divers minéraux et éléments, l'aspect lustré de la surface et autres facteurs qui laissaient penser que ces diamants se formaient dans les étoiles en explosion et riches en carbone, appelées supernovas. Ces étoiles peuvent produire un environnement à haute température semblable à celui préconisé pour le « dépôt chimique en phase vapeur », méthode de production des diamants de synthèse en laboratoire.

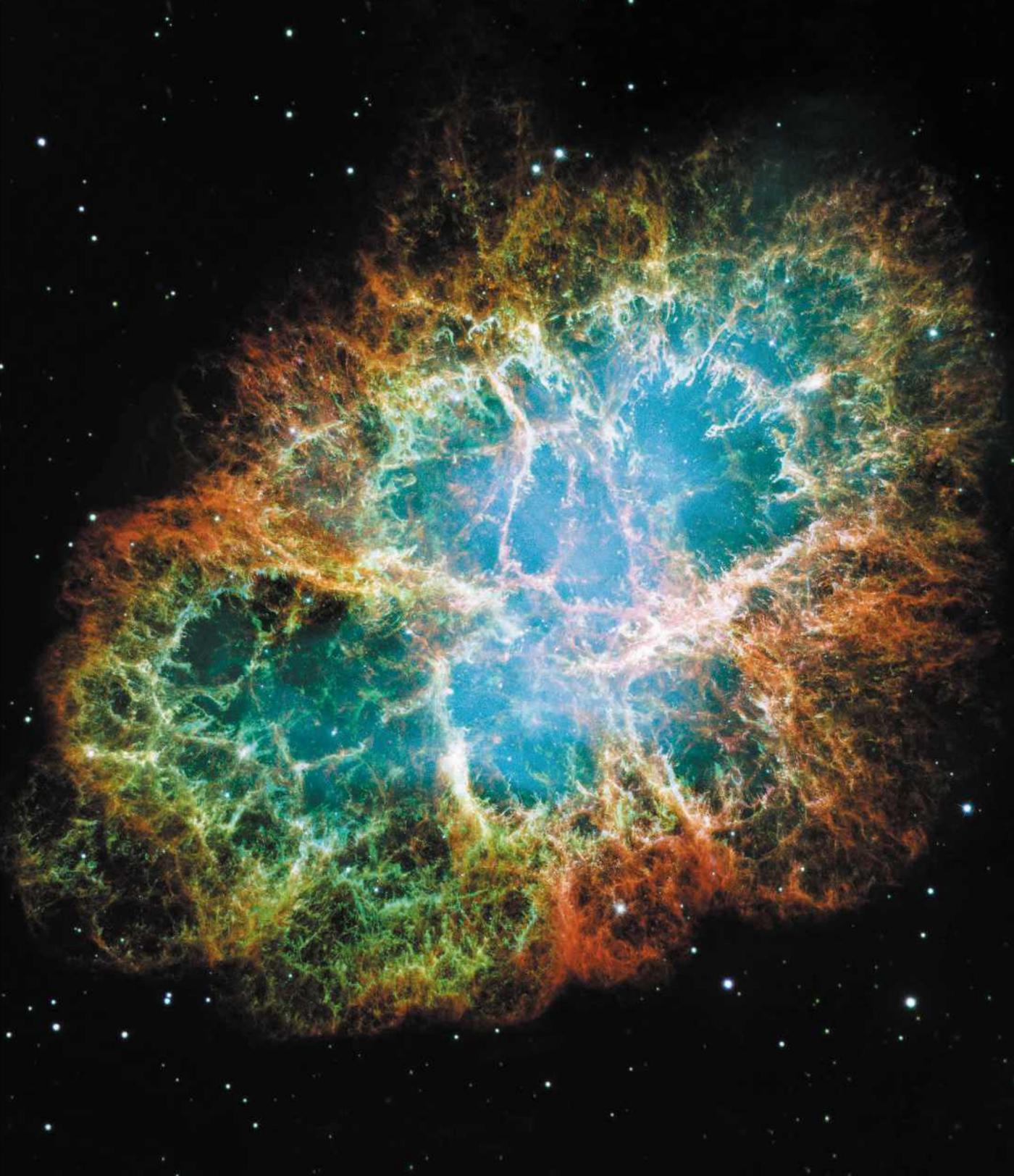
Les diamants noirs ont entre 2,6 et 3,8 milliards d'années et sont probablement apparus sur Terre grâce à la chute d'un grand astéroïde, à une époque où Amérique du Sud et Afrique n'étaient pas séparées. Aujourd'hui, nous trouvons la plupart d'entre eux en République centrafricaine et au Brésil.

Les carbonados sont aussi durs que les diamants traditionnels, mais ils sont opaques, poreux et composés de multiples cristaux de diamants collés entre eux. Ils servent parfois à couper les autres diamants. Les Brésiliens furent les premiers à découvrir les diamants noirs, vers 1840, et les appelèrent carbonados en raison de leur aspect carbonisé. Dans les années 1860, ils furent utilisés en exploitation minière pour creuser la roche. Le plus grand carbonado jamais trouvé a une masse approximative de 3 167 carats, soit 60 carats de plus que le plus grand diamant clair.

Parmi les autres formes naturelles de diamants noirs, autres que les carbonados, et d'aspect plus traditionnel, notons ceux dont la coloration sombre et fumée résulte d'inclusions minérales d'oxydes de fer ou de composés de soufre. Le splendide *Esprit de De Grisogono* (312,24 carats) est le plus gros diamant noir taillé de cette espèce et le cinquième plus gros diamant.

VOIR AUSSI Nucléosynthèse stellaire (1946).

Les étoiles en explosion appelées supernovas auraient produit l'environnement à haute température et le carbone nécessaires à la formation des carbonados. Ci-contre, la nébuleuse du Crabe, rémanent d'une supernova.



Réacteur nucléaire préhistorique

Francis Perrin (1901–1992)

La création d'une réaction nucléaire n'est pas une tâche simple. Dans les centrales, elle nécessite de scinder les atomes d'uranium, processus qui libère l'énergie sous forme de chaleur et par lequel les neutrons provoquent la scission d'autres atomes, réaction appelée fission nucléaire. Dans une centrale, la poursuite du processus requiert l'implication de nombreux chercheurs et techniciens.

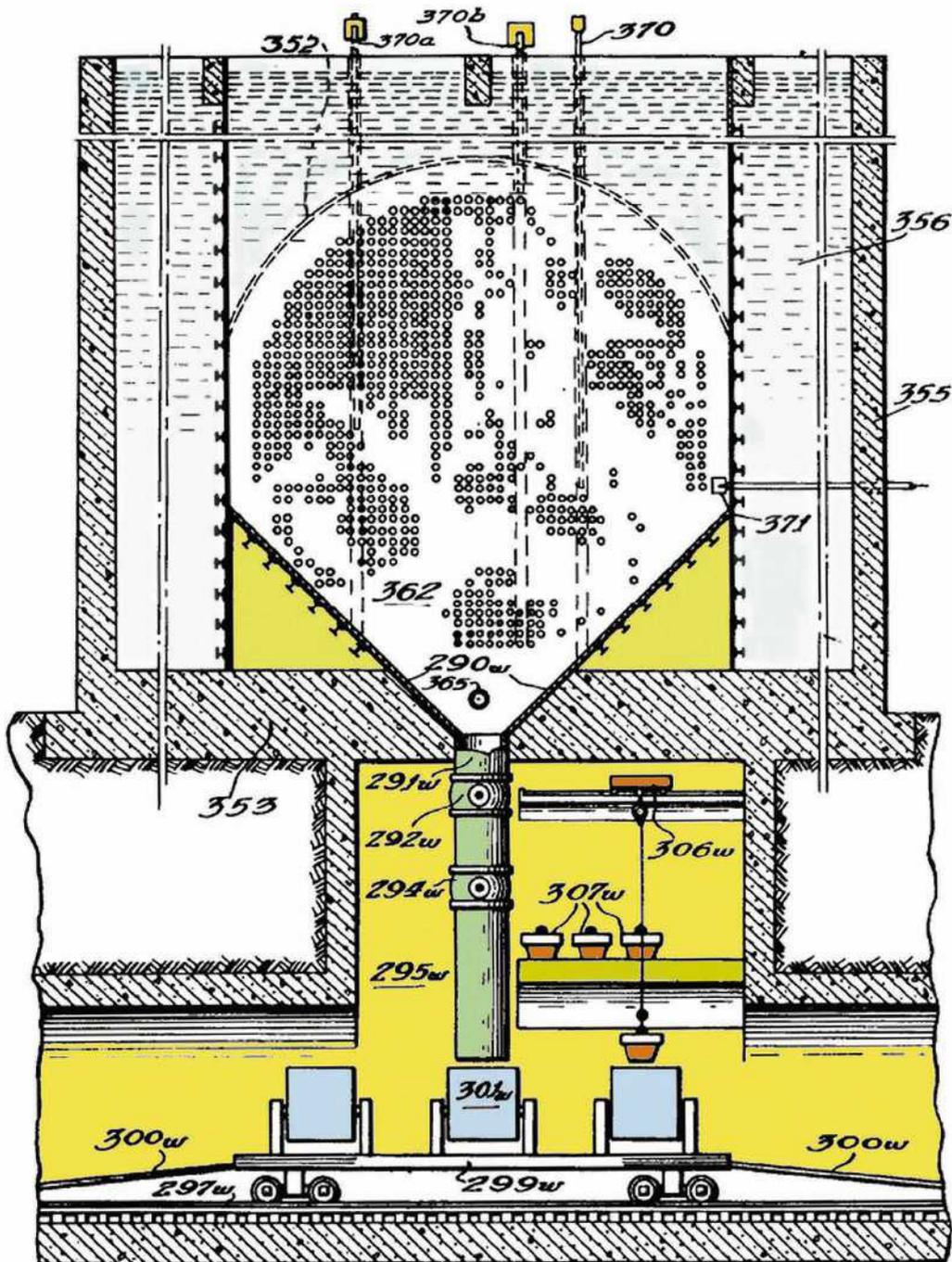
Ce n'est qu'à la fin des années 1930 que les physiciens Enrico Fermi et Léo Szilard comprirent que l'uranium était capable d'entretenir une réaction en chaîne. Ils menèrent des expériences à l'université Columbia et découvrirent la production importante de **neutrons** (particule subatomique) par l'uranium : la réaction en chaîne devenait possible, de même que les armes nucléaires. Le soir de sa découverte, Szilard écrivit : « J'étais presque sûr que le monde allait au-devant d'un grand malheur ».

En raison de la complexité du processus, le monde fut étonné, en 1972, quand le physicien Francis Perrin découvrit que la nature avait créé le premier réacteur nucléaire deux milliards d'années avant Sapiens, sous Oklo, au Gabon. Ce réacteur se forma quand un gisement riche en uranium entra en contact avec les eaux souterraines : les neutrons éjectés de l'uranium étaient ralentis, pouvaient interagir avec les autres atomes et les scinder. Il s'ensuivait une production de chaleur, transformant l'eau en vapeur, et un ralentissement temporaire de la réaction en chaîne. L'environnement se refroidissait, l'eau revenait et le processus se répétait.

D'après les scientifiques, ce réacteur naturel fonctionna pendant des centaines de milliers d'années, produisant les divers isotopes attendus et effectivement observés à Oklo. Les réactions nucléaires dans les veines d'eau souterraines ont consommé près de cinq tonnes d'uranium ²³⁵ radioactif. Aucun autre réacteur nucléaire naturel n'a été identifié. Dans son roman *Un pont de cendres*, Roger Zelazny imagine qu'une civilisation extraterrestre a créé la mine du Gabon afin de provoquer les mutations qui conduiraient finalement à l'espèce humaine.

VOIR AUSSI Radioactivité (1896), Neutron (1932), Énergie du noyau (1942), Bombe atomique *Little Boy* (1945).

La nature a créé le premier réacteur nucléaire en Afrique. Des milliards d'années plus tard, Léo Szilard et Enrico Fermi détenaient le brevet américain n° 2 708 656 sur le réacteur nucléaire. La cuve 355 est remplie d'eau qui fait office de protection contre les radiations.



Witnesses:
Herbert E. Matzoff

FIG. 38.

Inventors:
Enrico Fermi
Leo Szilard

Atlatl

En différents lieux du monde, les cultures anciennes ont découvert l'art de tuer à l'aide d'un instrument ingénieux, appelé atlatl (ou propulseur). L'outil ressemble à un bâton pourvu d'un crochet à une extrémité et repose sur le principe physique du levier : il permet de lancer une flèche sur une cible placée jusqu'à 100 mètres, à la vitesse de 150 kilomètres par heure. En un sens, l'atlatl prolonge le bras.

Un propulseur datant de 27 000 ans, en bois de cerf, a été découvert en France. Les Amérindiens utilisaient le dispositif il y a 12 000 ans, tandis que les Aborigènes d'Australie le baptisèrent *woomera*. Les peuples d'Afrique de l'Est et de l'Alaska utilisaient des armes semblables. Les Aztèques (qui lui donnèrent le nom d'*atlatl*) surprirent les conquistadors espagnols en perçant leurs armures à l'aide d'atlatls. À la préhistoire, les chasseurs utilisaient le propulseur pour tuer des animaux aussi imposants que le mammoth.

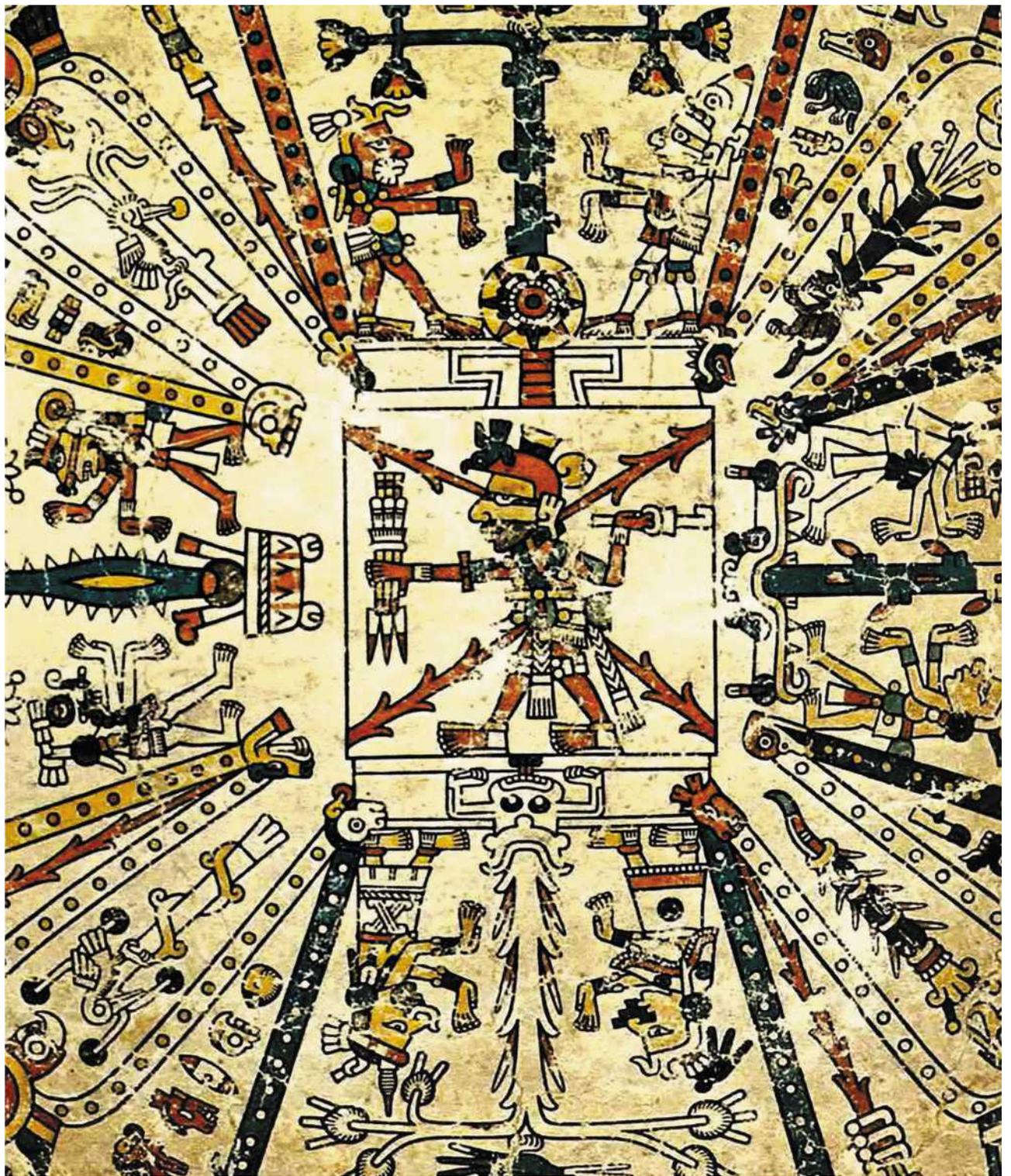
Aujourd'hui, la World Atlatl Association organise des compétitions nationales et internationales qui attirent ingénieurs, chasseurs et passionnés de la préhistoire.

L'une des versions de l'atlatl ressemble à un bâton d'une soixantaine de centimètres. Une flèche de 1,5 m se fixe sur une sorte de crochet à l'arrière du propulseur. Le détenteur de l'atlatl propulse la flèche avec un mouvement de balayage du bras et du poignet qui s'apparente à un service au tennis.

Au fur et à mesure de l'évolution de l'atlatl, les utilisateurs découvrirent que les propulseurs flexibles pouvaient retenir et libérer l'énergie efficacement (comme un plongeur sur un plongeur), et de petits lests en pierre furent ajoutés au dispositif. Leur utilité a été débattue au fil des années. Nombreux sont ceux qui pensent qu'ils apportent stabilité et distance de jet. Ces lests pourraient aussi atténuer le bruit afin de masquer le lancer.

VOIR AUSSI Arbalète (341 av. J.-C.), Trébuchet (1200).

Illustration extraite du codex aztèque Fejérváry-Mayer et montrant un dieu avec trois flèches et un atlatl. Ce codex est antérieur à la destruction, par Hernán Cortés, de la capitale aztèque Tenochtitlan, en 1521.



Boomerang

Le chanteur anglais Charlie Drake (1925–2006) évoquait dans l'une de ses chansons un Aborigène d'Australie qui se lamentait que son boomerang ne reviendrait pas. En pratique, ceux utilisés pour la guerre ou la chasse aux kangourous étaient des armes de jet qui avaient pour but de briser les os de la proie, et non de revenir au point de départ. Un boomerang de chasse, datant d'environ 20 000 av. J.-C., a été retrouvé dans une grotte, en Pologne.

Aujourd'hui, quand nous pensons à un boomerang, nous l'imaginons en forme de V. Cette forme a probablement évolué depuis les premiers boomerangs, quand les chasseurs remarquèrent que les projectiles ainsi courbés offraient un vol plus stable et prenaient des trajectoires intéressantes. Le boomerang avec retour est aujourd'hui utilisé à la chasse pour effrayer le gibier à plumes, mais nous ignorons à quelle date il fut inventé. Chaque pale du boomerang a la forme d'un aileron, arrondi d'un côté et plus plat de l'autre. L'air se déplace plus vite d'un côté de l'aile que de l'autre, ce qui aide à assurer la portance. À l'inverse d'une aile d'avion, le boomerang possède des « bords d'attaque » sur les côtés opposés du V, puisque le boomerang décrit une rotation lors du vol et qu'ainsi pale avant et pale arrière présentent alternativement des orientations opposées. Autrement dit, les pales du boomerang sont orientées dans des directions opposées.

Le boomerang est lancé à peu près à la verticale, la partie ouverte du V tournée vers l'avant. Tandis que le boomerang tourne dans la direction du lancer, la pale supérieure du boomerang avance plus vite que la pale inférieure, qui contribue aussi à la portance. La précession gyroscopique – modification de l'orientation de l'axe de rotation d'un corps en mouvement – permet le retour du boomerang vers le lanceur, s'il est lancé correctement. La combinaison de ces facteurs crée la trajectoire circulaire complexe du boomerang.

VOIR AUSSI Arbalète (341 av. J.-C.), Trébuchet (1200), Gyroscope (1852).

Les boomerangs sont utilisés comme arme et pour le sport. Leurs formes variables dépendent de leur origine géographique et de leur fonction.



Cadran solaire

« Ne cachez pas vos talents, ils méritent d'être utilisés. À quoi sert un cadran solaire à l'ombre ? »

Benjamin Franklin

Depuis des siècles, l'individu s'interroge sur la nature du temps. La philosophie grecque antique a voulu cerner le concept d'éternité, et le thème du temps est central dans toutes les religions et toutes les cultures. Angelus Silesius, poète mystique du XVII^e siècle, suggéra que le cours du temps pouvait être suspendu au moyen de pouvoirs mentaux : « C'est vous-même qui créez le temps ; le tic-tac de l'horloge est dans votre tête. À l'instant où vous cessez de penser, le temps s'arrête net ».

L'un des plus anciens dispositifs de mesure du temps est le cadran solaire. Les Anciens remarquèrent peut-être que leurs ombres étaient très longues tôt le matin, diminuaient progressivement et s'allongeaient à nouveau à l'approche du soir. Le premier cadran connu remonte à 3 300 av. J.-C. : il est gravé dans une pierre du *Knowth Great Mound*, le monument ancien le plus important d'Irlande.

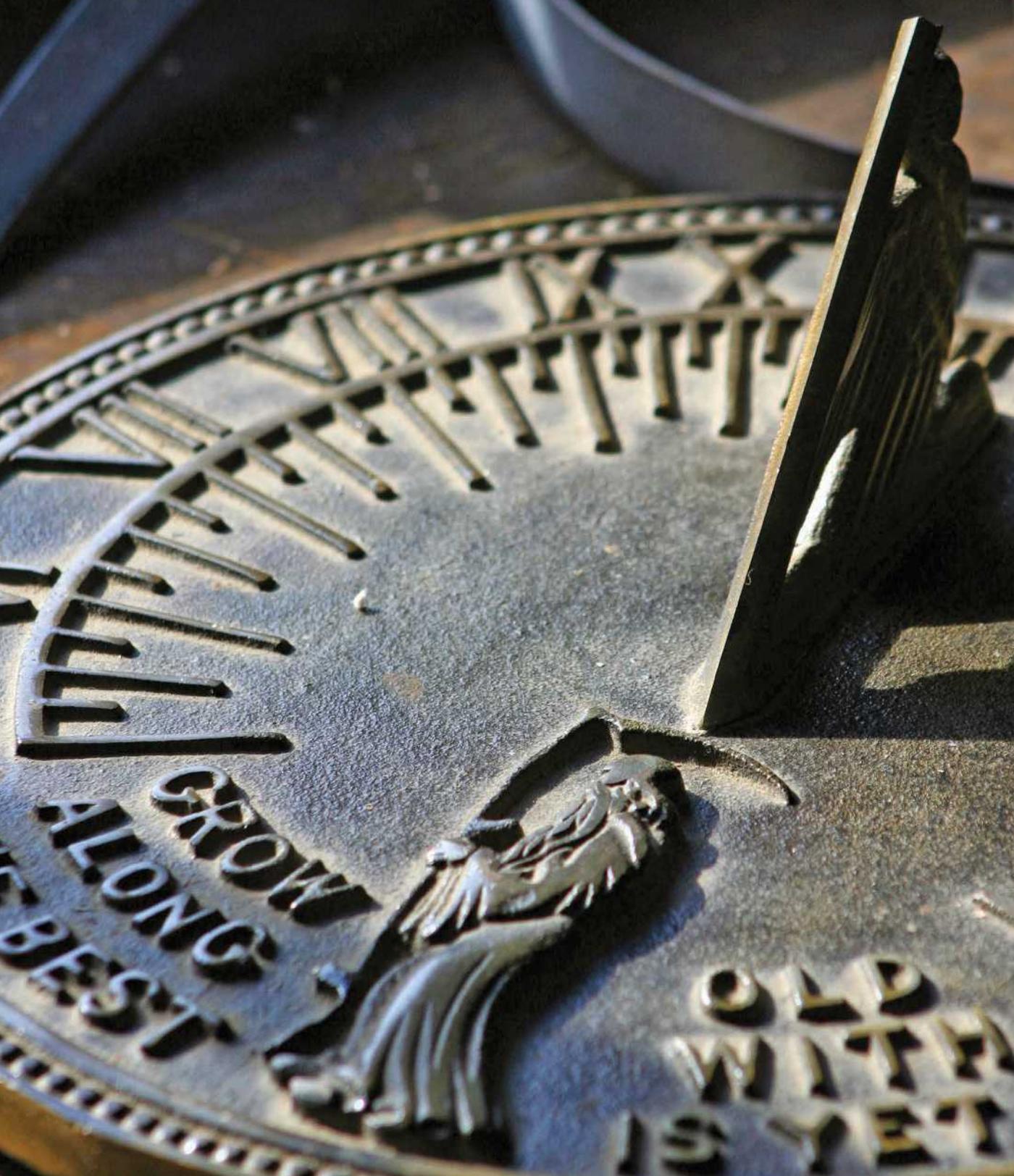
Il est possible de fabriquer un cadran solaire avec un bâton planté verticalement dans le sol (gnomon). Dans l'hémisphère Nord, l'ombre tourne autour du bâton dans le sens des aiguilles d'une montre et la position de l'ombre peut être utilisée pour marquer le passage du temps. La précision de l'instrument est améliorée si le bâton est orienté de façon à pointer vers le pôle nord céleste, ou approximativement vers l'étoile polaire. Ainsi, l'ombre du pointeur ne varie pas avec les saisons. Une forme courante du cadran dispose



d'une aiguille *horizontale*. On l'utilise parfois pour décorer un jardin. L'ombre ne tournant pas uniformément autour de ce cadran solaire, les marques de chaque heure ne sont pas espacées de façon égale. Différentes raisons, comme la vitesse variable de la Terre en orbite autour du Soleil ou l'utilisation de l'heure d'été, expliquent que les cadrans puissent ne pas être exacts. Avant l'apparition de la montre-bracelet existaient des cadrans pliables, attaché à une petite boussole magnétique pour indiquer le nord, qui tenaient dans la poche !

VOIR AUSSI Machine d'Anticythère (125 av. J.-C.), Sablier (1338), Pendule 400 jours (1841), Voyage dans le temps (1949), Horloges atomiques (1955).

L'être humain s'est toujours interrogé sur la nature du temps. L'un des plus anciens dispositifs de mesure de l'écoulement du temps est le cadran solaire.



Arche

En architecture, une arche est une structure courbe qui recouvre un espace tout en supportant un poids. Elle est devenue une métaphore de l'extrême durabilité créée par l'interaction de parties élémentaires, comme l'écrivait Sénèque : « Telle une arche, la société humaine ne se maintient que grâce à la pression mutuelle de ses différentes parties. » Et, selon un ancien proverbe hindou, « une arche ne dort jamais ».

La plus ancienne porte de ville en forme d'arche est la porte d'Ashkelon en Israël, construite vers 1850 av. J.-C. Les arches mésopotamiennes en briques sont encore plus anciennes, mais c'est dans la Rome antique que l'arche acquit une valeur prédominante, quand elle fut appliquée à un large éventail de structures.

Dans les édifices, l'arche permet de répartir la lourde charge de la partie supérieure en forces horizontales et en forces verticales sur les colonnes d'appui. La construction des arches s'appuie généralement sur des blocs en forme de coin, appelés voussoirs, qui s'emboîtent parfaitement. Les surfaces des blocs voisins propagent les charges de façon presque uniforme. Le voussoir central, en haut de l'arche, est appelé clé de voûte. Pour construire une arche, un cadre d'appui en bois est souvent utilisé jusqu'à l'insertion de la clé de voûte. L'arche devient alors autoportante. L'un des avantages de l'arche sur les structures antérieures est la facilité de transport des voussoirs et l'éventail de larges ouvertures. Autre avantage, les forces de gravitation sont réparties à travers l'arche et converties en forces approximativement perpendiculaires aux faces inférieures des voussoirs. Cependant, cela signifie que la base de l'arche est soumise à des forces latérales, qui doivent être contrebalancées par des matériaux (un mur en briques, par exemple) situés sur les côtés inférieurs. Une grande part de la force de l'arche est transformée en forces de compression sur les voussoirs – forces auxquelles les pierres, le béton et autres matériaux peuvent facilement résister. Les Romains édifiaient principalement des arches semi-circulaires. Dans les aqueducs romains, les forces latérales des arches adjacentes se compensaient.

VOIR AUSSI Poutres en I (1844), Tenségrité (1948), Tour penchée de lires (1955).

L'arche permet de répartir la lourde charge de la partie supérieure en forces horizontales et en forces verticales. Elle s'appuie généralement sur des blocs en forme de coin, appelés voussoirs, qui s'emboîtent parfaitement comme dans ces arches turques.