

50

CLÉS POUR COMPRENDRE LES
**GRANDES IDÉES
DE LA SCIENCE**

PAUL & GAIL
PARSONS DIXON

Traduit de l'anglais par Charles Frankel

DUNOD

Table des matières

Introduction 3

- 01** Le principe de Fermat **4**
 - 02** Les lois de Newton **8**
 - 03** La gravitation universelle **12**
 - 04** L'électromagnétisme **16**
 - 05** La thermodynamique **20**
 - 06** La relativité restreinte **24**
 - 07** La relativité générale **28**
 - 08** La mécanique quantique **32**
 - 09** Les champs quantiques **36**
 - 10** La physique des particules **40**
 - 11** L'énergie nucléaire **44**
 - 12** La théorie des cordes **48**
 - 13** La théorie de l'information **52**
 - 14** La théorie du chaos **56**
 - 15** Les ordinateurs quantiques **60**
 - 16** L'intelligence artificielle **64**
 - 17** Atomes et molécules **68**
 - 18** Le tableau périodique **72**
 - 19** La radioactivité **76**
 - 20** Les semi-conducteurs **80**
 - 21** Les supraconducteurs **84**
 - 22** Ballons de foot et nanotubes **88**
 - 23** La nanotechnologie **92**
 - 24** Les origines de la vie **96**
 - 25** La photosynthèse **100**
 - 26** La cellule **104**
 - 27** La théorie microbienne **108**
 - 28** Les virus **112**
 - 29** Les gènes **116**
 - 30** L'évolution **120**
 - 31** La diaspora d'*Homo sapiens* **124**
 - 32** La double hélice **128**
 - 33** Clonage et OGM **132**
 - 34** La biologie de synthèse **136**
 - 35** La conscience **140**
 - 36** Le langage **144**
 - 37** Les ères glaciaires **148**
 - 38** La tectonique des plaques **152**
 - 39** Les extinctions de masse **156**
 - 40** Le changement climatique **160**
 - 41** La révolution copernicienne **164**
 - 42** Les galaxies **168**
 - 43** Le Big Bang **172**
 - 44** La matière noire **176**
 - 45** L'énergie sombre **180**
 - 46** Le destin de l'Univers **184**
 - 47** Les trous noirs **188**
 - 48** Le multivers **192**
 - 49** Les exoplanètes **196**
 - 50** La vie extraterrestre **200**
- Glossaire 204**
Index 206

Introduction

Albert Einstein se plaisait à dire que « les grands scientifiques sont aussi des artistes ». La remarque ne laisse pas de surprendre, car la science en général semble manquer singulièrement de créativité. Régie par des observations et des données, elle laisse peu de place en apparence à l'esprit créatif. C'est loin d'être exact : le message que cherche à faire passer Einstein est qu'en science les esprits novateurs sont justement ceux qui sont les plus créatifs. Ce sont leurs idées, plutôt que leurs compétences techniques, qui révolutionnent notre conception du monde.

De temps en temps, en effet, un chercheur à la créativité extraordinaire surgit sur le devant de la scène, et sa vision du monde ne se limite pas à une évolution, mais bouleverse complètement les idées reçues et nous propulse dans une nouvelle dimension du savoir. Ce fut le cas d'Albert Einstein lorsqu'il formula ses théories de la relativité ou de Charles Darwin lorsqu'il établit le principe de l'évolution par sélection naturelle.

Ces chercheurs avaient aussi une grande compétence technique. Mais sans cette étincelle de génie créatif, même la maîtrise absolue des instruments mathématiques ou une connaissance encyclopédique du monde naturel n'auraient pu leur permettre de révolutionner la science comme ils l'ont fait. Ainsi, il est bon de se rappeler que la science à l'école ne doit pas se résumer à apprendre des théories par cœur.

Dans les chapitres qui vont suivre sont présentés les 50 plus grands concepts qu'ont échafaudés les chercheurs à travers les siècles. Les sujets retenus sont évidemment des choix personnels ; tout autre auteur aurait sans nul doute organisé ce livre différemment. Mais nous avons recherché un juste équilibre des thèmes, et nous espérons que le lecteur aura autant de plaisir à les découvrir que nous en avons eu à les présenter. Lorsque la place le permet, nous y avons joint de courtes biographies des chercheurs concernés, présentant leur parcours et leur vie personnelle. C'est donc à un fascinant voyage que nous vous convions, à la découverte des plus belles théories scientifiques élaborées par ces créateurs hors du commun. Et l'aventure continue : quelles idées nouvelles germent dans l'esprit des savants aujourd'hui et s'épanouiront dans les années à venir ?

Paul Parsons & Gail Dixon

01 Le principe de Fermat

À la fin du XVII^e siècle, le mathématicien français Pierre de Fermat décrit le comportement des rayons lumineux par une loi simple et élégante : pour voyager entre deux points, la lumière choisit le chemin le plus rapide. Ce concept a ouvert la voie à un principe encore plus fondamental de la physique moderne.

À l'époque de Fermat, les physiciens connaissaient déjà bien le phénomène de la « réfraction » : le changement de direction d'un rayon lumineux lorsqu'il passe d'un milieu à un autre. Trempez par exemple un crayon dans un verre d'eau : vu de profil, le crayon semble brisé en deux segments qui font entre eux un angle prononcé. Ce phénomène de réfraction a lieu lorsque les deux milieux n'ont pas la même « densité optique », à savoir que la lumière s'y propage à des vitesses différentes : l'angle de déviation du rayon lumineux est proportionnel au rapport de ces deux vitesses, selon une formule mathématique appelée loi de Snell-Descartes (voir encadré, page ci-contre). Restait à comprendre pourquoi.

Fermat entre en scène Fermat proposa « le principe de moindre temps », à savoir que la lumière prend toujours la trajectoire la plus brève entre deux points. Cette hypothèse permettait d'expliquer mathématiquement la loi de Snell-Descartes.

Une bonne analogie est celle du maître-nageur qui porte secours à une personne en train de se noyer. Il se trouve en haut de plage et pas directement en face de la personne en détresse. Quelle distance doit-il courir sur la plage, puis nager dans l'eau, pour arriver au plus vite ?

La distance la plus courte entre le maître-nageur et sa cible est bien sûr la ligne droite joignant les deux, donc on pourrait penser que c'est la trajectoire à

chronologie

984

Le mathématicien perse Ibn Sahl est le premier à énoncer les lois de la réfraction

1662

Pierre de Fermat propose que les rayons lumineux obéissent au principe de moindre temps

1744

Pierre-Louis de Maupertuis propose le principe de moindre action

suivre. Mais ce n'est pas le cas, car le maître-nageur court plus vite qu'il ne peut nager. Suivre une ligne droite l'amènerait à réaliser une trop grande partie du parcours dans l'eau. Courir le long de la plage jusqu'à se retrouver face à la personne avant de plonger n'est pas idéal non plus, car la distance courue est trop longue. La solution est un compromis entre les deux : courir en diagonale à travers la plage jusqu'à un point précisément calculé du rivage, puis changer d'angle lors de la mise à l'eau pour la seconde partie du parcours – tout comme un rayon lumineux lorsqu'il se réfracte.

L'explication physique qui sous-tend le principe de Fermat touche à la nature ondulatoire de la lumière, en particulier le phénomène d'interférence lorsque deux ondes se combinent en une seule. Si la crête d'une onde coïncide avec le creux d'une autre, elles s'effacent mutuellement. En revanche, si les deux ondes font coïncider leurs crêtes et leurs creux, leur somme est une onde amplifiée. Pour pratiquement chaque trajectoire suivie par une onde lumineuse, il en existe une autre qui interfère avec elle de façon destructive pour l'effacer. L'exception est la trajectoire de durée minimale : c'est celle où

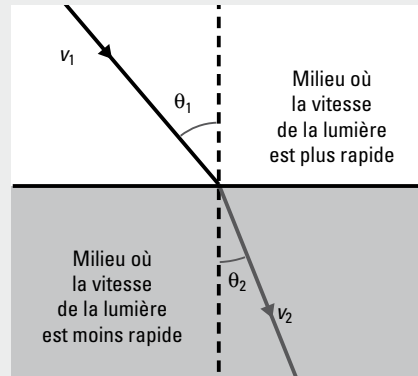
La loi de Snell-Descartes

Bien qu'elle porte aujourd'hui les noms de Willebrord Snellius et René Descartes, la loi qui décrit la réfraction des rayons lumineux fut énoncée plus de 600 ans auparavant par le mathématicien perse Ibn Sahl.

En présence d'une interface entre deux milieux, dans lesquels la vitesse de la lumière est respectivement v_1 et v_2 , alors les angles respectifs θ_1 et θ_2 entre les rayons lumineux et une ligne perpendiculaire à l'interface sont donnés par la formule

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = v_1 / v_2$$

(où \sin est la fonction trigonométrique sinus).



1788

Joseph-Louis Lagrange dérive du principe précédent la mécanique analytique

1915

Le mathématicien allemand David Hilbert dérive des actions la relativité générale d'Einstein

1948

Le physicien américain Richard Feynman formule l'intégrale de chemin en théorie quantique

la lumière nous est donc visible. Le principe de Fermat explique aussi les lois qui gouvernent la réflexion de la lumière à l'interface entre deux milieux, y compris la « réflexion totale interne » selon laquelle un rayon de lumière est incapable de s'échapper d'un milieu lorsqu'il frappe son interface selon un angle rasant, propriété exploitée dans les fibres optiques.

Le principe de Fermat allait lancer d'autres pistes. En 1744, le mathématicien Pierre-Louis de Maupertuis s'est ainsi demandé si au-delà du comportement des rayons lumineux, il pouvait s'appliquer à la dynamique des solides en mouvement. Il substitua au facteur temps du principe de Fermat l'énergie cinétique d'un objet, intégrée tout au long de ses multiples trajectoires possibles. Il postula alors que la trajectoire prise par l'objet serait celle qui réclamerait le minimum d'énergie cinétique.

Des actes plutôt que des mots À la fin du XVIII^e siècle, l'idée fut creusée par le mathématicien italien Joseph-Louis Lagrange et le physicien irlandais William Rowan Hamilton. Ils retouchèrent le théorème de Maupertuis pour intégrer non pas l'énergie cinétique d'un objet, mais son énergie cinétique moins son énergie potentielle (par exemple un boulet que s'apprête à lancer une catapulte n'a pas encore d'énergie cinétique, mais de l'énergie potentielle, stockée dans la flexion de la catapulte). Lagrange et Hamilton raisonnèrent que c'était cette nouvelle quantité, baptisée « action », qui se devait d'être minimale sur la trajectoire suivie par l'objet. Ce « principe de moindre action » leur permit d'expliquer les lois universelles du mouvement des corps d'Isaac Newton (voir page 8).

D'autres théories pouvaient être dérivées en minimisant l'action des corps, que ce soit en électromagnétisme ou en relativité générale (voir pages 16 et 28). Le principe s'avérait particulièrement utile lorsqu'il s'agissait de combiner des théories. Calculer le comportement d'un corps en présence à la fois d'un champ de gravité et d'un champ électromagnétique, par exemple, consiste à additionner les actions imputables à chacun, puis à trouver la trajectoire qui minimise cette action combinée.

Le physicien américain Richard Feynman a exploité ce principe de moindre action pour construire « l'intégrale de chemin » de la théorie quantique des champs (voir page 36) : la probabilité de l'état d'une particule à un moment

« La nature est économe dans toutes ses actions. »

Pierre-Louis de Maupertuis

donné dans le futur se trouve en intégrant les contributions de toutes ses trajectoires possibles, divisées par la probabilité qu'elle ait pris chacune d'entre elles. Le physicien américain Edwin Jaynes s'en est inspiré pour proposer qu'il existe d'étroits rapports entre la physique et la théorie de l'information (voir page 52).

Le principe de Fermat et celui de moindre action figurent parmi les outils les plus puissants de la physique moderne : ils se trouvent aujourd'hui au cœur des efforts pour tenter d'unifier les forces de la nature (voir page 48) et expliquer l'origine même de l'Univers (voir page 172).

Mécanique lagrangienne

L'analyse des systèmes mécaniques complexes était un véritable cauchemar jusqu'à ce que le mathématicien Joseph-Louis Lagrange introduise le principe de moindre action, jetant les bases de la mécanique lagrangienne.

Celle-ci offrait une méthode systématique pour résoudre les problèmes impliquant le mouvement de plusieurs corps sous l'influence de plusieurs forces, comme celui des planètes autour du Soleil, sujettes à des interactions gravitationnelles entre elles.

La méthode de Lagrange consistait à établir des coordonnées de position et de vitesse pour chaque objet. De la sorte, il pouvait écrire une fonction, le « lagrangien »,

représentant l'énergie totale – cinétique moins potentielle – du système. Son intégration sur toutes les trajectoires possibles dans l'espace et dans le temps donnait pour résultat « l'action » (voir page 7), à rendre minimale pour obtenir les équations décrivant le mouvement de chaque objet.

Dans le cas du Système solaire, les vitesses relatives des planètes se rapportaient à l'énergie cinétique totale du système, et les positions relatives des objets les uns par rapport aux autres à l'énergie potentielle totale, fournie dans ce cas par la gravité. Il en découlait les équations du mouvement, décrivant les orbites des planètes autour du Soleil.

L'idée clé

Un rayon de lumière suit le parcours le plus rapide

02 Les lois de Newton

En 1687, Isaac Newton publia un livre qui est l'une des bases de la physique mathématique moderne : une véritable révolution, fondée sur trois principes qui décrivent comment les objets se déplacent sous l'influence de forces. Ces lois allaient régir la physique du mouvement jusqu'au début du **xx^e** siècle.

Durant trois siècles, les lois de Newton ont parfaitement décrit le mouvement et l'interaction des objets dans la vie de tous les jours – une branche de la physique appelée « mécanique ». Le savant anglais les publia en 1687 dans son livre *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Principes mathématiques de la philosophie naturelle), mieux connu sous son titre abrégé de *Principia*. Jusqu'alors, la mécanique avait reposé sur les théories du philosophe grec Aristote, théories mises à mal par l'essor de la méthode expérimentale. Celles de Newton, en revanche, reposaient sur de rigoureuses équations mathématiques et donnaient des résultats parfaitement en accord avec les observations.

La première loi de Newton énonce que tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite, à moins qu'une force n'agisse sur lui (une idée déjà émise par Galilée en 1632). En substance, un objet stationnaire restera stationnaire et un objet déjà en mouvement continuera dans la même direction et à la même vitesse, si aucune force ne lui est appliquée. On peut alors se demander pourquoi, si on lâche ce livre, il se mettra à tomber : c'est parce que la gravité exerce sur lui une force dirigée vers le sol. En dehors des champs de gravité, ou lorsque les forces s'annulent comme en orbite terrestre, les objets ont bien un comportement stationnaire ou se déplacent de façon uniforme, tel que Newton l'avait prédit.

chronologie

iv^e siècle av. J.-C.

Le philosophe grec Aristote formule ses idées sur le comportement des objets en mouvement

1021

Le philosophe perse Al-Biruni propose l'accélération comme cause d'un mouvement non uniforme

1632

L'astronome florentin Galilée publie ses travaux sur le concept d'inertie

Force et inertie La deuxième loi quantifie de quelle façon le mouvement d'un objet est modifié lorsqu'une force s'applique sur lui. Newton énonce que l'objet accélère dans la même direction que la force, à un taux qui satisfait l'équation $\text{force} = \text{masse} \times \text{accélération}$. Cela signifie que sous l'action d'une même force, les objets de petite masse accéléreront davantage que les objets de masse supérieure : divisez la masse de moitié et l'accélération sera doublée.

La résistance au mouvement d'objets ayant une masse est appelée « inertie ». Elle s'explique à partir de la première loi. Un corps persévère dans son état de repos ou de mouvement uniforme, sauf si une force agit sur lui. L'inertie du corps, que lui confère sa masse, détermine de combien est changé cet état de repos ou de mouvement uniforme lorsque la force est appliquée.

Isaac Newton (1643-1727)

Isaac Newton est né à Woolsthorpe, un petit hameau du comté anglais de Lincolnshire. En 1661, il entre au Trinity College de Cambridge où il obtient son diplôme de bachelier (l'équivalent d'une maîtrise) en 1665, avant qu'une épidémie de peste ne le force à retourner à Woolsthorpe. Il y passe deux ans à l'écart du monde, plongé dans des réflexions qui vont aboutir à ses plus grandes théories.

De retour à Cambridge en 1667, Newton y est élu membre du corps enseignant, avant de devenir en 1669 titulaire de la chaire de professeur en mathématiques, à l'âge de 26 ans.

Durant sa carrière prolifique, Newton apporte des contributions majeures non seulement à la physique du mouvement, mais

aussi à celle de la gravitation, à l'optique, à la mécanique des fluides, à la thermodynamique et aux mathématiques. Il conçoit notamment le premier télescope réflecteur. Il est nommé président de la Société Royale – la plus ancienne société scientifique – en 1703, puis chevalier en 1705.

Newton est aussi connu pour ses inimitiés avec nombre de savants de son temps, notamment au sujet de la priorité de certaines de ses découvertes, et en tant que Maître de la monnaie royale s'est targué d'avoir envoyé plusieurs dizaines de faux-monnayeurs aux galères. Il est mort dans son sommeil le 31 mars 1727 de « causes naturelles », bien qu'il ait pu s'empoisonner au mercure, du fait de ses nombreuses expériences d'alchimie.

1687

Isaac Newton publie ses trois lois du mouvement dans son livre *Principia*

1750

Le mathématicien suisse Leonhard Euler étend les lois de Newton aux objets complexes

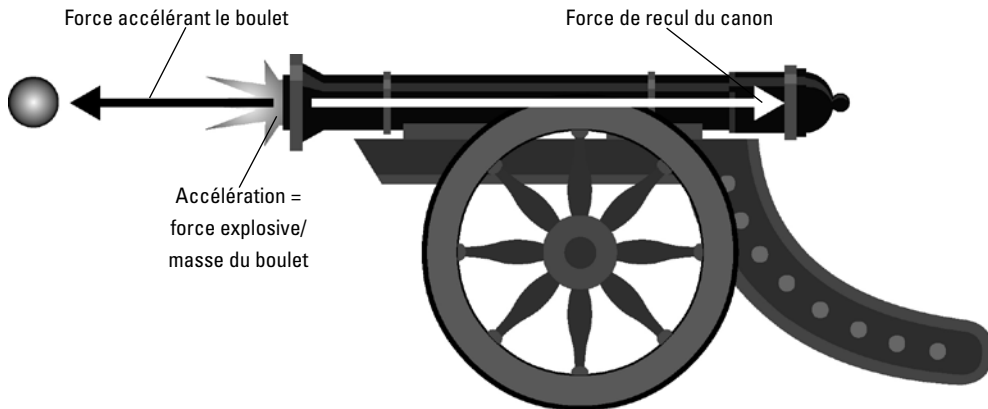
1905

Dans sa relativité restreinte Albert Einstein apporte des retouches aux lois de Newton

La troisième loi de Newton définit l'interaction réciproque entre les objets. Elle énonce que toute action crée une réaction d'intensité égale et de sens contraire. Si vous êtes assis sur une chaise, la force dirigée vers le bas par la masse de votre corps accélérée par la pesanteur est contrebalancée par une force égale et opposée que la chaise imprime à votre corps. La source de cette force, dite « réaction normale », est le réseau de liaisons chimiques entre les atomes qui constituent la chaise et qui assurent sa rigidité. Elle peut ne pas suffire : si vous êtes trop lourd, la chaise se brisera et la réaction normale disparaîtra.

Coup et contrecoup La troisième loi de Newton explique pourquoi une carabine recule contre votre épaule lors d'un coup de feu. Le percuteur met à feu la cartouche de poudre et l'expansion brutale des gaz de combustion dans le canon propulse la balle vers l'avant, mais en accord avec la troisième loi de Newton, une force égale et opposée propulse la carabine en sens inverse. Au passage, la seconde loi de Newton – force = masse \times accélération – explique pourquoi la balle accélère beaucoup plus vite que la carabine, bien plus massive.

Au sens strict, les lois de Newton ne s'appliquent qu'à des objets dont la masse peut être assimilée à un point dans l'espace, ce qui rend les calculs plus faciles, mais ne rend pas compte du monde réel. Vers 1750, le mathématicien suisse Leonhard Euler a donc adapté les lois de Newton aux objets de taille non nulle et a conclu que si l'on considère que la masse de l'objet est concentrée en son centre de gravité, alors ces lois restent pertinentes. En sus, il a découvert des lois complémentaires qui gouvernent la façon dont l'objet pivote sur lui-même – basées sur les forces de rotation ou « couples » appliqués à l'objet et sur la distribution précise de sa masse par rapport à son centre de gravité. Les équations



tions résultantes, dites de Newton-Euler, donnent ainsi une description plus réaliste du mouvement des corps.

Un champ restreint Il est pourtant des cas de figure où même ces lois élargies sont prises en défaut. En énonçant sa théorie de la relativité restreinte en 1905, Albert Einstein a ainsi démontré que les objets se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière ont des comportements qui diffèrent sensiblement de ceux prévus par les lois de Newton. Par la suite, sa théorie de la relativité générale (voir page 28) mena à des divergences supplémentaires, dans le cas de champs de gravité particulièrement forts. D'autre part, à partir des années 1920, il devint clair qu'à l'échelle des particules subatomiques, la vision ordonnée et déterministe de la physique newtonienne devait s'effacer devant le caractère probabiliste de la mécanique quantique (voir page 32). Toutefois, les lois d'Isaac Newton continuent d'offrir une approximation tout à fait acceptable du mouvement des corps à nos échelles familières d'espace, de temps et de champs de gravité, que ce soit celui de billes de billard ou de planètes en orbite autour du Soleil.

« Dans la nuit
se cachaient la nature
et ses lois, et Dieu dit
"que Newton soit",
et la lumière fut. »

Alexander Pope (1727)

L'idée clé

Les objets en mouvement
obéissent à trois lois
mathématiques

03 La gravitation universelle

En 1687, Isaac Newton publia le premier modèle mathématique de la gravitation, expliquant tous les mouvements observés : des trajectoires des boulets de canon aux orbites des planètes autour du Soleil. Les équations newtoniennes ont des applications multiples, notamment pour calculer les trajectoires des vaisseaux spatiaux.

En sus de ses trois lois sur le mouvement des corps (voir page 8), le chef-d'œuvre d'Isaac Newton – son livre *Principia* publié en 1687 – contenait aussi le premier énoncé scientifique de la force gravitationnelle. Avec la rigueur mathématique qui est la sienne, Newton y traite plusieurs exemples, comme le mouvement de billes sur une pente, ou encore les orbites planétaires. Sa loi stipule que la force gravitationnelle entre deux objets massifs est proportionnelle au produit de leurs masses, divisé par le carré de la distance qui les sépare. Doublez l'une des masses et la force double aussi. Doublez la distance, et la force diminue d'un facteur quatre. C'est un rapport mathématique relativement simple, auquel Newton est parvenu en étudiant le comportement d'objets en chute libre, ainsi que les tables astronomiques du mouvement des planètes.

La pomme de Newton La loi stipule qu'un objet lâché au-dessus de la Terre, par exemple une pomme qui tombe de sa branche, accélère vers le sol à un taux déterminé par la masse et le rayon de la Terre. À la surface de notre planète, cette accélération due à la gravité vaut 9,8 mètres par seconde... par seconde. C'est-à-dire qu'à chaque seconde qui s'écoule, la vitesse de chute de la pomme croît de 9,8 mètres par seconde – ici la masse de la pomme, insignifiante par rapport à celle de la Terre, peut être ignorée. Un objet lancé verticalement vers le ciel verra sa vitesse ralentir d'autant, avant de retomber. Et un objet lancé dont la vitesse comporte aussi une composante horizontale décrira une trajectoire courbe, appelée

chronologie

1609-1619

Johannes Kepler publie ses trois lois décrivant le mouvement des planètes

1666

Robert Hooke présente ses idées sur la gravité à la Société Royale de Londres

1687

Isaac Newton publie la théorie complète de la gravitation dans son livre *Principia*

parabole, pour percuter la Terre à une distance calculable du point de départ.

Appliquer la loi de Newton à un projectile sur Terre n'est qu'une première approximation, car notre atmosphère oppose à l'objet une certaine résistance : une force de friction qui le ralentit d'autant plus que sa vitesse est élevée. Cette résistance de l'air limite la vitesse d'un objet en chute libre à une valeur appelée « vitesse terminale » qui dépend de ses propriétés aérodynamiques. Ainsi, un parachutiste en chute libre atteint une vitesse terminale de 530 km/h. Une fois son parachute déployé, sa vitesse terminale chute à 28 km/h. Sur la Lune en revanche, où il n'y a pas d'atmosphère, la loi de Newton joue sans contrainte, comme l'a démontré en 1971 le commandant d'Apollo 14, Alan Shepard, qui transforma sa pelle de géologue en club de golf et frappa une balle qui parcourut dans le vide lunaire « des kilomètres et des kilomètres ».

En orbite Augmentez la vitesse d'un projectile lancé depuis la Terre et au-delà d'un certain seuil il ne retombera plus. S'il suit la courbure de la Terre, il décrira une orbite autour de notre planète. Augmentez encore sa vitesse, et il échappera à l'emprise de la gravitation terrestre pour voguer indépendamment à travers le Système solaire. Newton était particulièrement fier du caractère universel de sa théorie : le fait qu'elle s'appliquait à des objets à la surface de la Terre autant qu'à des planètes dans l'espace. Il dérivait d'ailleurs mathématiquement les lois de Kepler sur le mouvement des planètes à partir de sa loi de la gravitation (voir page 167).

L'œuvre de Newton ne fut pas encensée par tous ses contemporains. Le philosophe Robert Hooke accusa même Newton de plagiat, clamant qu'il avait

La loi de Newton

En langage mathématique, la loi de la gravitation universelle stipule que si deux corps de masses m_1 et m_2 sont séparés par une distance r , alors chaque corps est attiré vers l'autre par une force d'attraction g qui est donnée par la formule :

$$g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

où G est la constante gravitationnelle qui vaut $6,67 \times 10^{-11}$ (0,000000000067). La force g se mesure en unités appelées newtons (N), où 1 newton accélère une masse de 1 kilogramme de 1 mètre par seconde par seconde.

1798

Henry Cavendish démontre pour la première fois la gravitation newtonienne au laboratoire

1916

Albert Einstein retouche l'équation de Newton pour les cas extrêmes de la relativité générale

1945

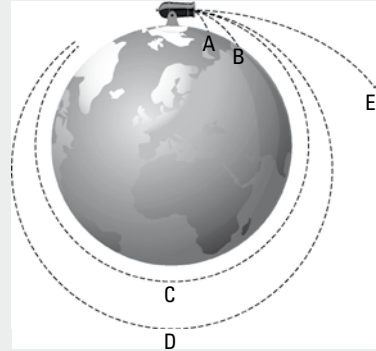
À partir de la théorie de la gravitation, Arthur C. Clarke imagine le concept d'orbite géostationnaire

L'expérience du canon

Isaac Newton a conçu un exercice mental pour démontrer que sa loi de la gravitation était adaptée autant à décrire l'orbite des planètes que la chute d'une pomme. Il propose d'imaginer ainsi un canon tirant son boulet depuis une haute montagne, à l'horizontale. La trajectoire du boulet est déterminée par sa vitesse et la force d'attraction de la Terre.

À des vitesses relativement modestes, le boulet suit une trajectoire courbe qui lui fait rapidement percuter le sol (trajectoire A sur le diagramme). Augmentez sa vitesse et le point d'impact sera de plus en plus éloigné du canon (trajectoire B). Augmentez-la encore, et le moment viendra où la vitesse du boulet donnera à sa trajectoire une courbure identique à celle du globe terrestre en dessous d'elle : le boulet ne touchera jamais le sol. On dit alors qu'il est en orbite (trajectoire C). Une vitesse plus grande encore donnera à sa trajectoire une forme en ellipse (D),

et au-delà d'une certaine valeur le boulet échappera à la gravité terrestre pour errer dans le cosmos (E) : c'est ce qu'on appelle la « vitesse de libération ». Celle-ci est dictée par la gravité de la planète et est indépendante de la masse du projectile : dans le cas de la Terre, cette vitesse est de 11,2 kilomètres par seconde.



lui-même déjà indiqué que la gravitation était proportionnelle à l'inverse du carré de la distance (le facteur $1/r^2$ de la formule de Newton, voir encadré page 13). Il est vrai que Robert Hooke avait présenté ses idées sur la gravitation à la Société Royale de Londres en 1666, mais le concept d'une gravitation proportionnelle à l'inverse du carré de la distance était déjà bien établi à l'époque, et ni Hooke, ni Newton n'en méritent la paternité. Ce qui ressort, en revanche, c'est que Newton est le seul chercheur à avoir intégré le concept dans une théorie complète, et à en avoir vérifié l'exactitude.

« Je peux calculer le mouvement des corps célestes, mais pas la folie des hommes. »

Isaac Newton

Le « grand G » La première expérience conduite au laboratoire pour confirmer la loi de Newton ne fut entreprise qu'en 1798 : elle est l'œuvre du physicien britannique Henry Cavendish. Ce dernier mesura la torsion d'un fil soutenant une barre avec deux petites sphères métalliques à ses extrémités, attirées par deux sphères massives à proximité. D'après l'attraction infime entre les sphères, et la minuscule torsion du fil résultante, on peut déduire la constante de proportionnalité G de l'équation de Newton : $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}/\text{s}^2$.

La théorie de la gravitation de Newton demeura incontestée jusqu'à ce qu'Albert Einstein publie sa théorie de la relativité générale qui prend en compte la courbure de l'espace-temps (voir page 28). Dans celle-ci, Einstein réussit à gommer un certain nombre d'anomalies qui affectaient la version initiale de Newton, comme le décalage entre la position prédite de Mercure sur son orbite et celle réellement observée, ou encore la courbure de rayons lumineux à proximité du Soleil. Ces corrections ne concernent que les champs gravitationnels particulièrement forts, l'équation du savant britannique restant tout à fait acceptable dans la vie de tous les jours.

L'une des conséquences de la loi de gravitation, appliquée aux satellites artificiels de la Terre, fut soulevée dans les années 1940 par le romancier britannique Arthur C. Clarke. Celui-ci réalisa qu'à une certaine altitude, un satellite fait le tour de la Terre dans le même temps (24 heures) que la planète tourne sur elle-même. Vu depuis le sol, le satellite semble alors immobile dans le ciel. Cette orbite « géostationnaire », à 35 786 km d'altitude, est celle utilisée aujourd'hui pour nombre de satellites de télécommunications et d'observation de la Terre.

L'idée clé
Les objets massifs
s'attirent mutuellement

04 L'électro- magnétisme

L'une des plus grandes inventions technologiques du monde moderne est la télécommunication par ondes radio. Elle découle d'une série de découvertes faites au XIX^e siècle, notamment celle de l'Écossais James Clerk Maxwell montrant que l'électricité et le magnétisme sont deux manifestations du même phénomène.

L'un des premiers indices montrant un lien entre électricité et magnétisme apparaît lors d'une expérience conduite par le physicien danois Hans Christian Ørsted. En 1820, le chercheur remarque que le passage d'un courant électrique dans un fil fait bouger l'aiguille d'une boussole à proximité. En déplaçant la boussole, il s'aperçoit que les lignes de force magnétique sont des cercles centrés sur le fil. Informé du phénomène, le physicien français André-Marie Ampère échauffe une théorie pour l'expliquer. Il note que les champs magnétiques dégagés par deux fils parallèles conduisent les fils à s'attirer si les courants circulent dans le même sens et à se repousser si les courants circulent en sens inverse. Le physicien exprime ce comportement par une loi mathématique connue aujourd'hui sous le nom de théorème d'Ampère : elle décrit le champ magnétique autour de chaque fil en fonction du courant et permet de calculer la force entre les deux.

Le courant passe En 1831, le physicien britannique Michael Faraday démontre l'effet inverse. Il enroule une bobine de fil autour de la moitié gauche d'un anneau de fer et la raccorde à une pile. Sur la moitié droite, il enroule une seconde bobine reliée à un galvanomètre (qui mesure le courant électrique). En branchant le courant dans la bobine de gauche, Faraday détecte un bref courant dans le galvanomètre de droite. Il en déduit que la bobine de gauche a généré un champ magnétique dans l'anneau, qui a généré à son tour un courant électrique dans la bobine de droite. Le physicien obtient également

chronologie

1820

Ørsted découvre qu'un courant électrique génère un champ magnétique

1820

Ampère élabore une théorie pour expliquer l'observation d'Ørsted

1831

Faraday démontre comment créer un courant électrique à partir d'un champ magnétique

un courant dans la bobine en déplaçant un aimant à proximité. Il en conclut que c'est la variation d'un champ magnétique qui génère un courant électrique – un effet baptisé « induction », et se fonde sur ce principe pour construire le premier générateur électrique : la dynamo.

C'est le physicien écossais James Clerk Maxwell qui révèle, en 1861, toute la complexité de l'interaction entre électricité et magnétisme. Maxwell reprend les travaux de Faraday, Ampère, Ørsted et leurs contemporains pour échauffer un système de quatre équations, reliant charge électrique, courant électrique et champ magnétique : les célèbres équations de Maxwell. On y associe aujourd'hui le nom des pionniers qui y ont contribué : équations de Maxwell-Gauss, Maxwell-Thomson, Maxwell-Faraday et Maxwell-Ampère.

Les deux premières équations reprennent les travaux du physicien allemand Carl Friedrich Gauss. La première statue que le champ électrique autour d'une charge électrique statique croît de façon directement proportionnelle à la charge en question. La seconde équation, dite de Maxwell-Thomson, précise que si le champ électrique « net » autour d'un tel point a une valeur non nulle, représentée symboliquement par des flèches partant radialement du point dans toutes les directions, le champ magnétique « net » autour d'un tel point est, quant à lui, nul. En d'autres termes, alors qu'il existe des charges électriques isolées (« monopoles »), les pôles magnétiques ne peuvent exister que par paires (« dipôles »), avec un champ magnétique courant de l'un à l'autre. Notre expérience courante nous le confirme : les aimants ont toujours un pôle « nord » et un pôle « sud ».

La troisième équation de Maxwell découle de la découverte de Faraday que le champ électrique autour d'un point (ou le courant circulant dans un circuit) peut être causé par le taux de changement, en fonction du temps, d'un champ magnétique. Quant à la quatrième équation, dite de Maxwell-Ampère, elle statue que le champ magnétique autour d'un point est défini par le courant en ce point, mais intègre aussi, conformément à la

« Il m'a été donné de découvrir un lien direct entre magnétisme et lumière, ainsi qu'entre électricité et lumière, et le champ ainsi ouvert est si vaste et, me semble-t-il, si fertile. »

Michael Faraday

1835

Gauss définit le champ électrique et le champ magnétique autour de charges électriques statiques

1861

Maxwell formule ses quatre équations reliant électricité et magnétisme

1864

Maxwell déduit de sa théorie l'existence d'ondes électromagnétiques