

MARC
LACHIÈZE-REY

GRA- VITA- TION

DÉPASSER EINSTEIN,
DU BIG BANG
AUX TROUS NOIRS

Flammarion

Gravitation

Marc Lachièze-Rey

Gravitation

Dépasser Einstein,
du Big Bang aux trous noirs

Flammarion

Du même auteur

- De l'infini*, avec Jean-Pierre Luminet, Dunod, 4^e éd., 2023
L'Âge de l'Univers, humenSciences, 2021
Einstein à la plage. La relativité dans un transat, Dunod, 3^e éd., 2021
Initiation à la cosmologie, Dunod, 5^e éd., 2020
Les Avatars du vide, Le Pommier, 2^{de} éd., 2019
De l'air à la terre. Weyl et la philosophie de jauge, avec Alexander Afriat, Hermann, 2017
« Cosmology after Einstein » in *Centenial of General Relativity*, World Scientific, 2017
Connaissance du cosmos, Albin Michel, 3^e éd., 2016
Voyager dans le temps. La physique moderne et la temporalité, Seuil, coll. « Sciences Ouvertes », 2013
Au-delà de l'espace et du temps. La nouvelle physique, Le Pommier, 2^{de} éd., 2008
L'Infini. De la philosophie à l'astrophysique, Hatier, coll. « Optiques Philosophie », 1999
Figures du ciel, avec Jean-Pierre Luminet, Seuil / Bibliothèque nationale de France, 1998
Le Rayonnement cosmologique, avec Edgard Gunzig, Masson, 1997
La Quête de l'unité. L'aventure de la physique, avec Étienne Klein, Albin Michel, 1996

Infographies : Thomas Haessig © Flammarion.

© Éditions Flammarion, Paris, 2023.

ISBN : 978-2-0802-3565-7

Prologue

Le long périple de la gravitation

Q uoi de plus familier que la chute des corps ? Et quoi de plus éloigné de notre intuition que trous noirs et ondes gravitationnelles ? Ces phénomènes relèvent pourtant du même phénomène : la gravitation.

De cette dernière, nous avons tous une idée. En nous souvenant de nos cours de physique, nous y pensons comme à une force, et en particulier au poids, cette force particulière qui pondère nos vies, nous rive au sol, entraîne l'eau des rivières d'amont en aval, et fait tomber les pommes des arbres. Cette appellation est cependant périmée – la physique moderne nous invite à parler d'*interaction* plutôt que de force, la gravité étant considérée comme l'une des « quatre interactions fondamentales de la nature » –, et notre théorie actuelle de la gravitation décrit cette dernière d'une manière encore bien différente.

Nous ressentons le poids des choses. Mais de là à conceptualiser la gravitation, il y avait un gouffre à franchir... C'est à Isaac Newton que revient le mérite d'avoir jeté le premier pont, au XVII^e siècle. Il nous a fait passer de la *chute des corps*, propension des objets à se diriger

vers le sol terrestre, à la *gravitation*, attirance mutuelle entre tous les objets massifs de l'Univers. Il identifie cette interaction, la formalise, en énonce les lois et en reconnaît la portée universelle, de la mécanique à l'astronomie. L'innovation est totale, au point que beaucoup estiment qu'elle fonde la vision moderne de la physique ! Toujours est-il que l'impressionnante collection de succès qui en découlera assurera sa réussite et sa popularité.

On parle de gravitation, de gravité, d'interaction gravitationnelle, d'attraction universelle... Ces différents termes décrivent le même phénomène, et je les considérerai comme équivalents dans cet ouvrage, même si certains leur prêtent de subtiles différences. En revanche, je réserverai le terme de *pesanteur* à l'attraction qu'exerce sur nous, sur tous les objets, la masse de la Terre (et parfois, par extension, d'autres planètes), sa manifestation la plus familière.

La physique newtonienne ne fut qu'une étape. Elle a cédé sa place, au début du XX^e siècle, à la relativité générale d'Einstein. Une nouvelle théorie de la gravitation, mais avec un point de vue radicalement différent. La relativité générale d'Einstein identifie la gravitation non pas à une force, comme le faisait Newton, mais à une forme, celle d'une nouvelle entité appelée espace-temps. L'essentiel de la révolution relativiste du XX^e siècle réside dans l'introduction de cette entité. L'espace-temps ne concerne pas seulement la gravitation, mais constitue le cadre fondamental au sein duquel s'exprime désormais toute la physique – et la gravitation apparaît de manière naturelle comme une de ses propriétés. Il s'agit donc de beaucoup plus qu'un simple changement de point de vue : cette nouvelle manière de voir le monde, révolutionnaire, engendre un bouleversement total du cadre de la physique.

Prologue

Aborder la gravitation nécessite d'entreprendre un long périple en partant de questions basiques : pourquoi, et comment, les objets tombent-ils ? Qu'est-ce qui gouverne les mouvements des astres dans l'Univers ? Des interrogations qui tournent autour de ces notions fondamentales que sont l'espace et le temps, la matière, les mouvements... Surtout les mouvements, puisque l'effet de la gravitation est de créer ou de modifier ces derniers. C'est pourquoi leur étude, sous forme de la cinématique et de la dynamique, constitue le préalable nécessaire à celle de la gravitation. Au point que dans sa version la plus moderne, je veux dire la théorie de la relativité générale, la gravitation se fond totalement dans la dynamique : elle devient la structure même de l'espace-temps, tandis que tout mouvement se déroule dans l'espace-temps, si bien qu'il ne peut y avoir mouvement sans gravitation.

Cependant, ce long périple n'est pas encore totalement mené à son terme. La relativité générale, en effet, n'est peut-être pas la « théorie ultime » de la gravitation, comme le montrent ses insuffisances lorsqu'il s'agit de décrire des cas extrêmes. En outre, il ne s'est pas (encore ?) révélé possible de la concilier avec la physique quantique, cet autre volet de la physique fondamentale. L'ambition de pallier ces problèmes nourrit une foisonnante activité de recherche. Les physiciens théoriciens explorent de nombreuses pistes pour aller plus loin, et analysent fébrilement les derniers résultats d'observation à propos des trous noirs, des fameuses ondes gravitationnelles, de la cosmologie...

C'est à revivre ce long cheminement que je vous invite dans cet ouvrage. Nous partirons de notre conception familière de la gravitation, qui résulte des travaux de Newton et de ses précurseurs, pour aboutir aux questions les plus actuelles. D'étape en étape, le voyage que

Gravitation

nous accomplirons nous obligera à prendre conscience que la nature de l'Univers est bien éloignée de notre vision intuitive. Notre regard doit changer, jusqu'à reconnaître un monde où espace et temps ne sont plus que des fictions. Un monde parsemé d'objets monstrueux comme les trous noirs, qui défient notre imagination ; un monde déformé, où les trajets courbes des rayons lumineux engendrent de surprenants mirages ; un monde dont les vibrations se propagent des milliards d'années avant de nous atteindre...

Chapitre 1

LA GRAVITATION UNIVERSELLE DE NEWTON

« J'ignore ce que le monde pensera de mes œuvres, mais il me semble que j'ai été comme un petit garçon jouant au bord de la mer, trouvant ici un galet mieux poli, là une coquille plus agréablement nacrée, tandis que l'océan infini de vérité m'offrait son immensité inexplorée. »

Isaac Newton, vers 1727 ¹

1. Paroles attribuées à Newton par Joseph Spence dans *Anecdotes, Observations and Characters, of Books and Men*, 1820.

Hic depositum est quod mortale fuit Isaaci Newtoni.
« Ici repose ce qui fut la part mortelle d'Isaac Newton » : telle est l'inscription latine que comporte son tombeau. Son œuvre, quant à elle, a sans aucun doute acquis l'immortalité. Les multiples biographies qui lui ont été consacrées¹ s'accordent à considérer le savant comme un être à part, au caractère singulier et aux raisonnements difficiles à reconstituer. Dans les pages qui suivent, après un bref rappel historique², nous tenterons de retracer l'élaboration de sa loi universelle de la gravitation, tout en présentant quelques notions utiles sur la manière de traiter les mouvements en physique.

De la chute des corps aux corpuscules ultramondains

Bien avant Newton, philosophes et penseurs de tous horizons avaient tenté de rendre compte de la tendance des corps à tomber vers le bas, dite *chute des graves* – c'est-à-dire la chute des objets lourds, pesants. Certains y reconnaissaient déjà l'expression d'une sorte d'attraction mutuelle entre le sol et les objets, mais sans faire encore

1. Voir par exemple Richard Westfall, *Newton*, Flammarion, 1994.

2. Nous laisserons de côté sa pratique de l'alchimie, qui fut tardivement découverte (voir Loup Verlet, *La Malle de Newton*, Gallimard, 1993), même si certains suggèrent que la notion alchimique d'« affinité » aurait pu lui suggérer celle de gravitation. Nous ignorerons de même ses recherches théologiques, ses brillants travaux en optique, ainsi que toute sa tardive et très efficace activité en tant que ministre des Finances.

le lien avec, par exemple, le ballet des planètes, que les différents systèmes du monde ¹ décrivaient sans rapport avec cette gravité.

Selon Empédocle, au V^e siècle avant notre ère, l'amour gouvernerait le monde en alternance avec son opposée, la haine, ce qui expliquerait que certains corps s'attirent tandis que d'autres se repoussent. Un siècle plus tard, Aristote décrivait le poids comme une tendance des corps à rejoindre leur « lieu naturel », dans le cadre de sa théorie des cinq éléments terre, eau, feu, air et quintessence. Pour la plupart des corps qui nous environnent, majoritairement composés des éléments « terre » et « eau » du point de vue d'Aristote, ce lieu naturel est occupé par le centre de notre planète, vers lequel ils ont donc tendance à se déplacer. La direction qui pointe vers ce lieu naturel, c'est la verticale. Les corps célestes, quant à eux, sont constitués de quintessence : ils appartiennent à la sphère supralunaire, où les mouvements relèvent du cercle.

Modestement, Newton déclarait que, s'il avait vu plus loin que les autres, il n'était lui-même qu'un « nain juché sur les épaules de géants ». L'expression n'est pas de lui (elle est attribuée au philosophe médiéval Bernard de Chartres), mais elle convient parfaitement, tant les réflexions sur la gravitation ont occupé les grands esprits à travers les siècles. C'est surtout sur les épaules de Galilée que Newton a pu s'appuyer. À la fin du XVI^e siècle, le savant toscan se sert de plans inclinés et de pendules pour étudier les mouvements des corps sous l'influence de leur poids. Galilée montre plusieurs résultats qui préparent le terrain pour la reconnaissance et la

1. Voir M. Lachièze-Rey et J.-P. Luminet, *Figures du ciel*, Le Seuil/Bibliothèque nationale de France, 1998.

formulation de la gravitation qui viendra un peu plus tard : il définit la notion d'accélération, identifie le rôle de la résistance de l'air, reconnaît la nature parabolique de la trajectoire des objets lors d'une chute, et récuse l'opinion selon laquelle la vitesse de chute d'un corps est proportionnelle à son poids. Son innovation peut-être la plus importante est l'introduction du temps comme paramètre pour repérer ces mouvements. Dans un autre domaine, celui de l'astronomie, il rejette également, à partir de ses observations du ciel, la distinction entre les mondes sublunaire et supralunaire, préparant ainsi l'universalité de la physique.

Que la gouvernance du mouvement des astres soit de même nature que le poids n'est pas encore reconnu à cette époque. Malgré cette ignorance, par ses contributions à la dynamique céleste au tout début du XVII^e siècle, l'astronome allemand Johannes Kepler peut sans aucun doute être considéré comme un précurseur de Newton. Son grand œuvre consiste à avoir déterminé, à partir des données relevées par Tycho Brahe à l'observatoire d'Uraniborg, la nature elliptique des orbites des planètes autour du Soleil, et à avoir exprimé les trois lois (toujours valables aujourd'hui) qui gouvernent leurs mouvements. De plus, les historiens des sciences reconnaissent dans l'attribution, par Kepler, d'un rôle actif de « gouverneur du ciel » au Soleil, une préfiguration de l'attraction gravitationnelle.

Johannes Kepler est un admirateur de Galilée. Ils sont tous deux partisans de la révolution copernicienne qui, en plaçant le Soleil au centre du Système solaire et en considérant la Terre comme mobile, prépare le grand bouleversement newtonien. Sans véritablement identifier la gravitation, Kepler fait allusion à une « influence magnétique » du Soleil sur les planètes, grâce à laquelle

celles-ci parcourent leurs orbites autour de lui. Ces questions d'influence agitent en tout cas tous les esprits. Le philosophe français René Descartes, par exemple, privilégie l'action par contact et refuse explicitement, en 1644, l'idée d'une action à distance entre les astres. Adversaire de Newton par anticipation, il invoque un « éther tourbillonnaire » qui, uniformément réparti entre les corps, agirait sur eux. Cette réduction de la gravité à un système de tourbillons sera reprise par l'astronome néerlandais Christiaan Huygens.

En 1748, le physicien genevois Georges-Louis Le Sage propose une autre idée : il attribue (après d'autres) la gravité à un genre d'effet d'écran. Il imagine une pluie universelle et omnidirectionnelle de particules qu'il qualifie de « corpuscules ultramondains ». Un corps matériel fait écran à ce flux de corpuscules pour tout autre corps, ce qui supprime sur ce dernier les impacts en provenance de sa direction : la résultante des impacts venant des autres directions agit alors sur lui comme une force dirigée vers le premier corps, qui tend donc à les rapprocher. *A contrario*, un corps isolé n'est pas affecté, puisque les impacts s'y répartissent uniformément. Le calcul montre que ce modèle de gravitation permet de retrouver la loi des carrés inverses qui sera avancée par Newton. Le modèle sera par la suite (au XIX^e siècle) amendé et perfectionné, mais ne résistera finalement pas aux critiques.

Le secret d'un confinement productif

Si l'on voulait dater l'invention de la gravitation, on devrait sans doute évoquer la remarquable « année miraculeuse » de 1665-1666, que Newton a qualifiée de « la plus fertile et créative de sa vie ». Il a alors 23 ans. La peste a

éclaté à Londres : confiné dans la ferme familiale du Lancashire, Newton est abandonné à lui-même. Des circonstances extrêmement favorables à un travail assidu, comme il l'a reconnu plus tard. Il s'adonne aux mathématiques, et notamment au calcul intégral, qui en deviendra une spécialité d'importance fondamentale, avec des applications majeures en physique. En même temps, Newton s'intéresse à la nature de la lumière et à sa composition. Et il développe sa théorie de la gravitation, au point d'être déjà en mesure de calculer l'orbite de la Lune sous l'influence de la Terre.

Newton ne s'est guère pressé pour publier ses résultats... ni même pour en parler. Il y sera finalement poussé par un collègue et ami, l'astronome anglais Edmond Halley (1656-1742). Ils apparaîtront dans son ouvrage *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Principes mathématiques de la philosophie naturelle*), en 1687. Newton y promulgue le règne universel de la gravitation et énonce la loi qui régule les mouvements, aujourd'hui appelée loi fondamentale de la dynamique ou deuxième loi de Newton. Il prend ainsi la suite de Galilée dans l'œuvre d'unification des mondes terrestre et céleste : les lois qu'il énonce sont universelles, valables à tout moment et partout dans le monde, qu'il est maintenant permis de qualifier d'Univers. Universalité, unification, unité : ces caractéristiques de l'Univers consacrent la naissance de la physique moderne, sinon de la physique tout court. Après la publication des *Principia*, la renommée de Newton atteindra des sommets en Angleterre – il y sera révééré comme un demi-dieu lors de ses grandioses funérailles, quarante ans plus tard. Il faudra un peu plus de temps pour que sa physique soit acceptée en France, acquise aux idées de Descartes.

• Des mathématiques pour des succès... astronomiques !

Les effets de la gravitation se manifestent par une modification des mouvements : déclencher une chute, infléchir, accélérer ou ralentir une trajectoire. C'est pourquoi on ne peut l'exprimer sans impliquer les lois du mouvement, que ce soit pour une première vision grossière ou pour les analyses les plus sophistiquées. Les deux lois de Newton, celle de la dynamique et celle de la gravitation, vont de pair et forment le socle d'une physique qui se révèle extrêmement performante. Elles rendent aussi bien compte de la chute des corps que de la trajectoire d'un projectile, ou encore des mouvements orbitaux de la Lune et des autres planètes. Elles expliquent notamment les lois de Kepler, qui en apparaissent comme de simples conséquences.

Afin d'exprimer ses lois, Newton a dû inventer un arsenal mathématique entièrement nouveau, qu'il a baptisé « méthode des fluxions ». Cet arsenal est devenu une branche entière des mathématiques, connue aujourd'hui sous le nom de « calcul différentiel », qui s'est révélée indispensable à de nombreuses disciplines. Newton a mis au point son calcul pendant son année miraculeuse, mais ne l'a rendu public que dans ses *Principia*. Cette publication tardive a alimenté une vive controverse, car son collègue concurrent, et opposant, Gottfried Leibniz, a accompli indépendamment (à peu près) les mêmes développements, qu'il a publiés trois ans plus tôt.

Cette branche des mathématiques sera développée et étendue par différents mathématiciens et physiciens des siècles suivants (notamment le mathématicien français Joseph-Louis Lagrange), ce qui permettra à la physique newtonienne d'aller de succès en succès. Les lois de

Newton vont en effet bientôt montrer leur pouvoir prédictif en astronomie, une qualité nécessaire à toute bonne théorie.

Halley, qui avait persuadé Newton de publier les *Principia*, avait lui-même découvert et calculé, grâce aux travaux de Newton, la périodicité (environ 76 ans) de la comète de 1682, qui portera son nom, et il prédit son retour pour 1758. La confirmation observationnelle de cette prédiction, avec la réapparition de la comète en décembre 1758, fut un triomphe des théories de Newton, au point que l'astronome français Jérôme Lalande (1732-1807) déclara qu'il s'agissait du « phénomène le plus satisfaisant que l'astronomie nous ait jamais offert ».

La seconde confirmation spectaculaire de la physique newtonienne fut la découverte de Neptune, en 1846, après qu'avaient été décelés dans l'orbite d'Uranus des écarts par rapport à ce que prédisent les lois de Newton. Plutôt que de rejeter ces dernières, Urbain Le Verrier (1811-1877), astronome à l'Observatoire de Paris, fit l'hypothèse que ces perturbations s'expliquaient par la présence d'une planète inconnue. Le Verrier s'empessa de calculer la position de sa supposée planète perturbatrice. Et, en effet, l'astronome allemand Johann Galle (1812-1910) vérifia sa présence depuis l'Observatoire de Berlin, dans la nuit du 23 au 24 septembre 1846. Succès éclatant encore pour la gravitation newtonienne – les planètes du Système solaire, jusque-là, avaient toutes été découvertes par l'observation directe, et jamais par le calcul. François Arago, alors directeur de l'Observatoire de Paris, salua la prouesse par ce bon mot : « M. Le Verrier vit le nouvel astre au bout de sa plume ! » Prouesse que reproduisent aujourd'hui, d'une certaine manière, les découvertes d'exoplanètes, ces planètes externes au Système solaire (voir l'encadré ci-après).

Aux yeux de la communauté scientifique, le succès des lois de Newton est alors complet.

D'« autres mondes » autour des étoiles

Les lois de la gravitation enchaînent les planètes de notre Système solaire à décrire un ballet ininterrompu autour du Soleil. Ce cas est-il unique ?

Les astronomes soupçonnent depuis longtemps que les autres étoiles sont entourées de cortèges planétaires, même si l'Inquisition catholique a brûlé vif le philosophe Giordano Bruno en place de Rome, en 1600, pour avoir osé l'affirmer. Il a fallu attendre la fin du xx^e siècle pour en avoir la confirmation. La détection d'une telle exoplanète est longtemps restée hors d'atteinte, car la luminosité de l'étoile autour de laquelle elle orbite, très proche sur le ciel, éclipse totalement la sienne. Et ce n'est qu'en 1995 que fut détectée la première, 51 Peg b, à l'Observatoire de Haute-Provence, par les astronomes suisses Michel Mayor et Didier Queloz, ce qui leur a valu le prix Nobel de physique en 2019.

Or c'est par l'intermédiaire de la gravitation que cette détection fut possible. L'attraction gravitationnelle de l'étoile engendre bien sûr le mouvement orbital de la planète. Réciproquement, l'étoile possède un faible mouvement dans l'orbite commune, qui peut être décelable bien que la planète ne soit pas visible – la composante radiale de sa vitesse est en effet mesurable par spectroscopie, grâce à l'effet Doppler qu'elle engendre (voir le chapitre 5). Cette méthode des vitesses radiales a permis la découverte de centaines d'exoplanètes, ainsi que l'évaluation de leurs caractéristiques (masse, excentricité et période orbitales, distance à l'étoile).

Il existe bien sûr d'autres méthodes pour détecter la présence d'exoplanètes. Par exemple, la méthode

La gravitation universelle de Newton

des transits : elle consiste à détecter et à mesurer par photométrie la baisse (périodique) de brillance d'une étoile, due au passage de la planète devant elle dans la ligne de visée. Des milliers de détections ont été effectuées par cette méthode.

La physique des mouvements

Revenons aux mouvements qui traduisent les effets de la gravitation. Pour le dire simplement, les corps s'attirent les uns les autres. Et, sous l'effet de cette attirance, chaque corps agit sur chaque autre en le mettant en mouvement (la gravité terrestre fait tomber la pomme) ou en modifiant son mouvement (elle incurve la trajectoire du boulet de canon).

On ne peut donc espérer comprendre et caractériser la gravitation sans analyser et caractériser en profondeur les mouvements eux-mêmes, en particulier les notions essentielles de vitesse, d'accélération, de force... D'ailleurs, si Newton a pu en énoncer les lois, c'est qu'il a d'abord mis au point les outils permettant de caractériser ces notions. Quelques précisions s'imposent avant de présenter les expressions mathématiques de la loi fondamentale de la dynamique et de la loi de la gravitation.

• Cinématique et dynamique

La première étape consiste à introduire une distinction primordiale : le mouvement d'un objet est *libre* (on dit aussi *inertiel*) s'il n'est soumis à aucune influence externe, aucune poussée, aucun contact, aucune propulsion par un moteur... ce que l'on résume en déclarant qu'il ne subit « aucune force » (ce qui est le cas si les

différentes forces s'annulent). L'étude des mouvements libres fait l'objet de la *cinématique*.

L'étude des autres mouvements, non inertiels, ceux qui sont soumis à une influence externe, fait l'objet de la *dynamique*. Ces mouvements se caractérisent par le fait qu'ils sont accélérés, et le but de la dynamique est de comprendre comment.

• Les piliers de la cinématique

Examinons d'abord la cinématique. Elle se caractérise par sa simplicité. Que peut-il en effet arriver à un corps libre ? Ce corps ne subit aucune influence. S'il est au « repos », il reste bien entendu au repos. S'il est déjà en mouvement, puisque rien ne l'influence, le corps libre ne peut que conserver le même mouvement – autrement dit ne pas changer de direction, c'est-à-dire aller tout droit, et conserver la même vitesse. Comme on appelle accélération un changement de vitesse, en direction ou en intensité, cela revient à dire qu'il ne subit aucune accélération.

Ainsi, un corps inertiel ne montre que deux types de mouvement : soit il reste au repos, soit il parcourt une droite dans l'espace à vitesse constante (en intensité et en direction). Ce double énoncé constitue ce que l'on appelle le *principe d'inertie*. C'est le fondement de la cinématique newtonienne, que l'on peut tout aussi bien qualifier de galiléenne car elle avait déjà été formulée par Galilée. Dans la vie courante, on a tendance à assimiler la notion d'inertie à celle de repos mais Newton et Galilée avaient déjà compris la portée plus large du mouvement inertiel en l'associant au mouvement uniforme.

Le *principe de relativité*, second pilier de la cinématique, abolit la distinction entre repos et mouvement

uniforme, qui tous deux caractérisent les mouvements libres, comme nous venons de l'évoquer. Il déclare qu'elle n'a pas vraiment de sens physique. « Le mouvement est comme rien », écrivait Galilée. Assis en train de lire, je me crois au repos, mais l'orbite de la Terre m'entraîne à 30 km/s dans le Système solaire. Serait-ce le Soleil, plutôt que la Terre, qui est au repos ? Mais ce dernier lui-même voyage encore dix fois plus vite dans notre galaxie, qui elle-même se déplace encore plus rapidement par rapport à ses consœurs... Je n'ai aucun moyen de décider qui est au repos plutôt qu'en mouvement. Et le principe de relativité énonce qu'il n'existe vraiment aucun critère physique pertinent qui pourrait le permettre. Seule prend un sens la notion de repos, ou de mouvement, *relatif*. Celle de mouvement *absolu* est dépourvue de toute pertinence physique. Je rappelle que nous ne considérons, pour le moment, que des mouvements libres.

Ce principe de relativité peut s'énoncer en stipulant que toutes les lois de la physique s'écrivent de manière strictement identique du point de vue de celui qui est « au repos » comme de celui qui est (ou apparaît) en mouvement uniforme¹. Il en résulte, en tout cas, l'impossibilité physique de reconnaître, sans référence extérieure, si le navire, le train ou l'avion dans lequel nous sommes embarqués est au repos ou en mouvement uniforme. Galilée avait déjà énoncé ce principe.

1. Ou bien, dans un langage plus technique, les lois de la physique s'énoncent de manière strictement identique dans deux *repères inertiels* différents. De manière très générale, on qualifie de « repère » (ou « référentiel ») le cadre particulier dans lequel tel ou tel observateur exprime les lois gouvernant les phénomènes qu'il peut observer, mais la notion est loin d'aller de soi et doit être maniée avec précaution si l'on veut éviter les malentendus.

Pour régler le cas de la cinématique, il ne reste qu'à énoncer la manière dont les vitesses se composent tout simplement en s'additionnant, comme nous en avons l'habitude. Du moins selon la cinématique newtonienne, car nous avons appris aujourd'hui qu'elles se composent d'une manière différente – nous y reviendrons au chapitre 3.

• Forces, accélérations et dynamique

Du point de vue de Galilée et de Newton, un objet n'est pas libre, pas inertiel, s'il est soumis à la gravité. Son mouvement ne relève donc pas de la cinématique : c'est la *dynamique* qui s'occupe des mouvements des objets non libres, soumis à une influence externe. Cette influence empêche le mouvement d'obéir au principe d'inertie – elle le « force » à s'écarter de la trajectoire inertielle. C'est pourquoi Newton la qualifie tout naturellement de *force*.

Puisqu'une trajectoire inertielle se caractérise par une vitesse constante, en intensité et en direction, ce qui l'écarte se manifeste par une modification de la vitesse avec le temps. Ainsi, le mouvement non inertiel se caractérise par une force, dont l'effet est de communiquer une accélération au corps sur lequel elle s'applique, c'est-à-dire de le mettre en mouvement s'il est au repos et, sinon, de modifier sa vitesse.

La *loi fondamentale de la dynamique* précise le lien entre la force F et l'accélération γ qu'elle communique au corps. Nous savons bien que la même force F n'aura pas le même effet sur un gros objet et sur un petit objet, ou encore sur un objet lourd et sur un objet léger. Chaque objet est caractérisé par une quantité qui exprime à quel point il résiste à la mise en mouvement.

On pourrait l'appeler *résistance inertielle*, comme l'avait suggéré le mathématicien allemand Hermann Weyl, mais on parle plutôt de *masse d'inertie*, et bien souvent de masse tout court. Je la désignerai par la lettre grecque μ .

Ayant exposé ces différents points dans ses *Principia*, Newton exprime finalement sa loi fondamentale de la dynamique : $F = \mu\gamma$. Peu importe la nature de la force F , qu'elle soit communiquée par un moteur, par un contact, par une interaction électromagnétique ou gravitationnelle, cela ne change pas son effet.

Tout est grave

Après avoir déterminé ce que sont force et accélération, on peut suivre Newton en abordant la gravitation. C'est une action de tout corps massif sur chaque autre corps. On qualifie volontiers d'*actif* le corps qui exerce l'action, et de *passif* celui qui la reçoit. Mais l'action est réciproque (ce qui est parfois exprimé comme l'expression d'un « principe de l'action et de la réaction »), si bien que chaque corps est à la fois actif et passif, même si l'action de la pomme sur la Terre apparaît insignifiante par rapport à sa réciproque.

Comment le corps actif agit-il sur les autres dans le cas de la gravitation ? Quelle force exerce-t-il ? On peut faire l'analogie entre la gravité et l'électricité. Chaque corps (sauf s'il est électriquement neutre) est muni d'une charge électrique, qui exprime sa capacité à engendrer une action électrique. Et, en même temps, cette charge électrique exprime la capacité du corps à *ressentir* une action électrique. C'est la même chose dans le cas de la gravitation, en remplaçant charge électrique par charge

gravitationnelle, ou plutôt par « masse gravitationnelle », le terme consacré¹. La force gravitationnelle qu'exerce un corps actif A sur un autre P est ainsi proportionnelle à la fois aux deux masses gravitationnelles impliquées : celle du corps actif M_A , mais aussi celle du corps passif M_P , donc finalement au produit des deux, $M_A M_P$. J'utilise la lettre latine M pour distinguer la masse gravitationnelle de la masse d'inertie μ introduite plus tôt. Pourquoi les deux quantités, si différentes, sont-elles toutes deux qualifiées de masses ? Nous traiterons un peu plus loin cette question absolument fondamentale. Cette masse gravitationnelle est quoi qu'il en soit la « quantité de matière » à laquelle Newton fait allusion dans la septième phrase du Livre III des *Principia* : « La gravité agit universellement sur tous les corps et est proportionnelle à la quantité de matière qu'ils contiennent. »

Contrairement à une force électrique, qui est parfois répulsive, la force gravitationnelle est toujours attractive. La direction de la force gravitationnelle va donc du corps passif vers le corps actif, ce qui traduit cette attirance. Et son intensité diminue avec la séparation D entre les deux corps, plus précisément comme l'inverse de son carré. Tout cela constitue la loi de gravitation écrite par Newton :

$$F = \frac{G M_A M_P}{D^2}$$

La loi fait intervenir une constante universelle de proportionnalité G , la constante [de gravitation] de Newton. La théorie ne précise pas sa valeur. Comme pour la plupart des constantes de la physique, seules les

1. D'une manière formelle, on distingue masse gravitationnelle *active* (celle qui agit) et *passive* (celle qui subit), mais elles se confondent et sont pareillement désignées.

expériences peuvent la déterminer. Comme le précise Newton, cette loi a un caractère universel : elle opère aussi bien sur la Terre que dans le ciel, aussi bien aujourd'hui qu'hier ou demain, aussi bien à notre échelle terrestre qu'aux distances les plus infimes (où les effets de la gravité sont d'ailleurs le moins bien compris), et jusqu'à celles de l'Univers entier.

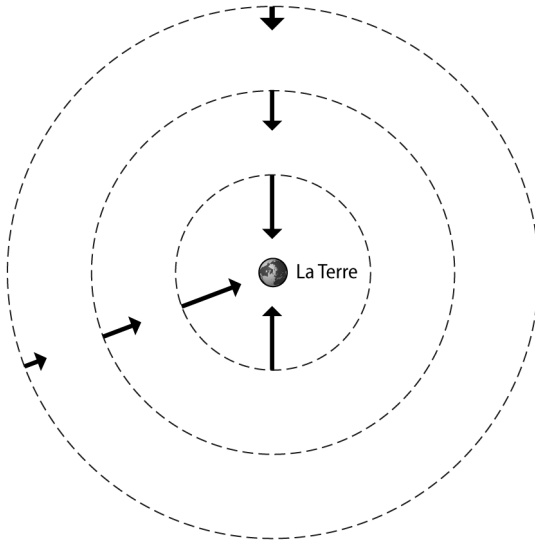
- **Une masse crée un champ gravitationnel**

On peut exprimer de manière commode la gravitation newtonienne « en elle-même », c'est-à-dire en l'isolant des effets qu'elle exerce – on introduit à cet effet les notions de *champ* et de *potentiel*. La formule écrite plus haut nous indique que la force F agissant sur un objet P est toujours proportionnelle à la masse gravitationnelle M_P de cet objet. On peut mettre cette masse à part, ce qui permet de définir le *champ gravitationnel* C par la formule $F = C M_P$. La notion de potentiel, voisine, est introduite plus bas.

L'intérêt du champ vient de ce qu'il caractérise l'intensité de la gravitation sans dépendre du corps sur lequel elle s'exerce. Si l'on veut connaître la force exercée sur un objet, il suffit de multiplier le champ par la masse de cet objet, comme indiqué ci-dessus (la valeur du champ s'identifie à celle de la force exercée sur un objet de masse unité). Les mathématiciens qualifient ce champ de *vectoriel* car, comme la force, il possède une direction (celle qui pointe vers le corps actif) et une intensité en tout point de l'espace – graphiquement, sa valeur en un point se représente par une flèche.

Chaque objet massif (alors considéré comme actif) crée un champ C , qui agit sur tous les autres objets, en leur imprimant une force. Le Soleil engendre un champ

Gravitation



Visualisation d'un champ gravitationnel. Les flèches représentent le champ créé par une masse sphérique comme la Terre : elles s'orientent vers son centre, que l'on qualifie de centre de masse. Les cercles sont les équipotentiels, surfaces de valeur constante du potentiel. Le champ représente la variation en intensité et en direction du potentiel (son gradient).

gravitationnel C , et exerce sur la Terre la force d'attraction $M_{\text{terre}} C$. Deux manières de décrire la même chose.

La loi de la gravitation vue plus haut se reformule en écrivant qu'un objet de masse M_A crée un champ gravitationnel $C = G M_A / D^2$, où D est l'éloignement par rapport à l'objet gravitant. Si plusieurs objets massifs sont présents, les champs qu'ils engendrent s'additionnent (par addition de vecteurs). En un point de l'espace, par exemple, le champ admet des contributions de la Terre, de la Lune, du Soleil, des autres planètes, des astéroïdes et des comètes, des étoiles et des galaxies lointaines... Au physicien de reconnaître les corps qu'il

peut négliger dans cette liste, car trop lointains ou trop peu massifs. On peut aussi avoir affaire à une distribution continue de masses, comme dans un fluide. On la caractérise par sa *masse volumique* ρ (masse par unité de volume) en chaque position. La loi de la dynamique prend alors une expression différente, mais équivalente, appelée « loi de Poisson ». Nous en reparlerons au chapitre 3, car la loi fondamentale de la relativité générale en constitue une généralisation.

Si l'on connaît la valeur du champ, on peut estimer tout effet gravitationnel, en particulier calculer la trajectoire de n'importe quel corps (satellite, comète, planète, etc.) qui y réside ; dans le Système solaire, ou n'importe où ailleurs. La règle est simple : en chaque point, l'accélération subie par un corps est égale à la valeur du champ. Cette simplicité est loin d'être évidente *a priori*.

• D'une masse à l'autre

Pour mieux comprendre ce que représente la masse, revenons sur les deux lois newtoniennes, celle de la gravitation et celle de la dynamique. La gravitation s'exprime sous forme d'un champ C : tout objet P (de masse M_P) plongé dans ce champ ressent la force $F = C M_P$. C'est la loi de la gravitation. En même temps, la loi de la dynamique énonce que cette force communique à l'objet P une accélération $\gamma_P = F/\mu_P$. Ces deux relations nous fournissent donc l'égalité $\gamma_P = C M_P/\mu_P$, où nous voyons intervenir les deux sortes de masses que nous avons introduites. D'un côté, la masse gravitationnelle M_P exprime la sensibilité à la gravitation, à quel point P la ressent (ici, donc, la forme passive). Dans ce sens, elle joue le rôle d'une « charge gravitationnelle », analogue à celui de la charge électrique. De l'autre côté, la masse

d'inertie μ_P exprime au contraire la résistance à l'accélération, à la mise en mouvement – si j'exerce la même poussée sur ma bicyclette et sur une locomotive, les résultats diffèrent, car leurs masses d'inertie ne sont pas les mêmes.

Ici intervient la propriété fondamentale, le véritable « miracle » de la gravitation : pour n'importe quel corps, les deux quantités M et μ , masse gravitationnelle et masse d'inertie, se révèlent égales. Nous y reviendrons au chapitre 3, car ce miracle est lié au « principe d'équivalence », qui joue un rôle tout à fait fondamental dans la théorie actuelle de la gravitation. Il en résulte en tout cas que le rapport M_P/μ_P disparaît dans la formule écrite plus haut, puisqu'il est égal à l'unité : l'action de la gravitation sur un corps se résume à lui communiquer une accélération égale à la valeur du champ (tous deux des vecteurs).

• Masse et énergie

Poursuivons notre exploration de la notion de masse. Comme pour toute grandeur physique, il existe une unité « légale » de masse, le kilogramme (kg). De la Révolution française jusqu'à mai 2019, cette unité était définie comme la masse d'un objet bien spécifique : le kilogramme-étalon, constitué d'un cylindre en platine iridié déposé au pavillon des Poids et Mesures, à Sèvres. Malgré les précautions prises, la masse de ce cylindre sembla diverger de celles de ses copies, et cette unité a finalement été redéfinie à partir de constantes fondamentales.

Par ailleurs, depuis le début du XX^e siècle, nous savons que la masse représente de l'énergie, ce qu'exprime la célèbre formule $E = mc^2$. Souvent interprétée comme

énonçant une équivalence entre masse et énergie, cette formule déclare plutôt que la masse est une forme d'énergie. De ce fait, les physiciens voient souvent c^2 comme un simple facteur de conversion entre unités de masse et d'énergie. C'est pourquoi il est par exemple tout aussi légitime d'exprimer la masse d'une particule en unité de masse comme le gramme qu'en unité d'énergie comme l'électronvolt (eV), ainsi que les physiciens des particules ont l'habitude de le faire. L'usage de l'un ou de l'autre se révèle plus pratique selon les circonstances.

La masse (ou masse propre, ou masse au repos) d'un corps est l'énergie qu'il possède au repos. Mais une particule en mouvement très rapide (par exemple dans un accélérateur de particules tel que le Grand collisionneur de hadrons du CERN) possède, du point de vue d'un expérimentateur au repos, une énergie supérieure de plusieurs milliers de fois à sa masse au repos. Quant au photon (voir l'encadré ci-dessous), condamné à se déplacer à la vitesse c , il ne peut être au repos. Dépourvu donc de masse au repos, il possède pourtant une énergie importante, au point que quasiment toute l'énergie que nous consommons sur Terre a été convertie à partir de celle des photons solaires. Nous verrons, à propos de la relativité générale, que toute forme d'énergie, pas seulement celle sous forme de masse, engendre de la gravitation.

Les particules du modèle standard

Tout ce que contient l'Univers peut être considéré comme constitué de particules élémentaires, décrites selon le *modèle standard* de la physique des particules.