

PIERRE **BINÉTRUY**

# **À LA POURSUITE DES ONDES GRAVITATIONNELLES**

Dernières nouvelles de l'Univers

DUNOD

### **Crédits photographiques**

p. 60: R. Hurt (SSC), JPL-Caltech, NASA; p. 63: NASA, ESA, R. Ellis (Caltech), and the UDF 2012 Team; p. 64: NASA, ESA, the Hubble Heritage Team; p. 67: V. Springer/Virgo Consortium; p. 71 gauche: NASA; p. 73: Niedzwiedek78; p. 75: John Dubinski/University of Toronto; p. 112: james633-Fotolia.com; p. 115: NASA/WMAP Science Team/ NASA/ JPL-Caltech/ESA; p. 116-117: ESA and the Planck Collaboration; p. 118: ESA, HFI & LFI consortial; p. 119: NASA/JPL; p. 126: NASA/CXC/M. Weiss; p. 127: Hubble Space Telescope NASA; p. 144: bennnn-Fotolia.com; p. 145: Attila Csorgo; p. 154: NASA/CXC-Digitized Sky Survey; p. 156: ESO; p. 157: Hubble ESA/NASA; p. 184: Caltech-Cornell; p. 197: University of Maryland (College Park, Md.); p. 219: ESA; p. 233: ESA.

Illustrations de l'intérieur: Rachid Marai

Illustration de couverture: © Sakkmasterke/Shutterstock

Photo de plat 4 de couverture: Mary Erhardy

© Dunod, 2015, 2016  
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff  
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-075860-9

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.

# AVANT-PROPOS

Ce livre est une introduction à l'univers de la gravité. Il ne nécessite pas de connaissance scientifique particulière; il évite toute la formulation mathématique qui constitue l'ossature de la théorie d'Einstein, la relativité générale. Mais il cherche toutefois à en présenter les idées et les concepts, ceux qui sont les mieux établis comme ceux qui sont l'objet des recherches les plus actuelles et de débats au sein de la communauté scientifique. Les comprendre nécessite un investissement personnel, mais, en principe, tous les outils nécessaires sont présents dans ce livre.

Le prologue donne une vision d'ensemble, une feuille de route de ce qui vous attend. La lecture peut se poursuivre de façon linéaire, de chapitre en chapitre. Vous y trouverez des encadrés qui précisent une notion, ou des informations plus techniques. Ils peuvent satisfaire votre curiosité ou bien être laissés de côté.

Mais peut-être serez-vous impatients de connaître la suite... Les focus en fin de chapitre se feuilletent à votre guise. Ils gagnent bien sûr à être lus à la suite du chapitre associé. Toutefois, ils se concentrent sur un aspect particulier et doivent pouvoir être découverts séparément.

J'ai porté une attention particulière à deux outils de lecture importants, situés en fin de volume : le glossaire et l'index. Ce dernier relie les différents thèmes couverts par le livre : vous y verrez que les concepts réapparaissent sous des éclairages divers qui permettent de mieux en cerner les contours. Au gré de vos futures lectures (je ne doute pas que les prochaines années seront fertiles en découvertes dans ce domaine), vous pourrez rapidement retrouver grâce à l'index les explications adéquates, ou les scientifiques qui ont contribué au développement des idées et aux découvertes.

Ce livre se veut donc aussi un outil pour comprendre aujourd'hui et demain les clés de notre Univers.

Je souhaite terminer en remerciant tous ceux qui m'ont permis de construire peu à peu cette synthèse de nos connaissances sur la physique de l'Univers grâce à leurs questions et leurs interrogations : spectateurs des diverses conférences grand public que j'ai pu donner, participants aux laboratoires Origins organisés par Marie-Odile Monchicourt et Michel Spiro, journalistes, étudiants, amis... Anne Bourguignon, des éditions Dunod, et Jean-Luc Robert ont su me convaincre d'écrire ce livre. Qu'ils soient aussi remerciés pour leur lecture attentive, ainsi que Gorka Alda, Gérard Auger, Marie Verleure. Ceci m'a été d'une aide précieuse.

Annecy, 30 décembre 2014

Je n'imaginai pas en écrivant cet avant-propos à la première édition que l'histoire de l'Univers gravitationnel s'écrivait si rapidement et que seulement neuf mois plus tard, une onde gravitationnelle serait enfin détectée, cent ans après la prédiction d'Einstein. Un événement majeur qui ne rend que plus nécessaire une vision globale de l'Univers gravitationnel telle que celle présentée dans ce livre.

Je profite de cette nouvelle édition pour remercier les quelques 90 000 participants au cours en ligne «Gravité!» (en français et en anglais) avec lesquels j'ai eu tant de plaisir à partager ces heures si excitantes.

PIERRE BINÉTRUY, Paris, septembre 2016

à G. A., G. G. et S. H.



# PROLOGUE

## LA NUIT TRANSFIGURÉE

*Tâchez de garder toujours un morceau de ciel au-dessus de votre vie.*  
Marcel Proust, *Du côté de chez Swann*, 1913.

Nous sommes tous déjà sortis un soir d'été par une belle nuit sans lune, et nous sommes extasiés au spectacle des étoiles qui semblaient moucher le ciel noir de scintillements. Après quelques minutes d'attention, nous avons repéré la bande laiteuse de la Voie Lactée, quelques constellations, identifié des couleurs différentes, et deviné un fourmille-ment de lumières en arrière-plan, laissant entrevoir d'autres étoiles plus lointaines encore. L'Univers s'étend sous nos yeux, dans toute sa majesté et son immuabilité. Et nous nous sentons bien peu de chose, grain de poussière jeté parmi ces grains de lumière, pour une durée dérisoire au regard du temps cosmique. Pendant des siècles, poètes, philosophes, artistes, conteurs ont rêvé, écrit, débattu sur cette perspective vertigineuse s'offrant à celui qui prend le temps de relever la tête et d'observer la nuit étoilée. Tout semble avoir été dit. Et pourtant...

Et pourtant, la physique de ce dernier siècle nous a montré que l'Univers observable est beaucoup plus riche que ce que nos yeux nous révèlent, et que cette richesse est accessible, ici, sur Terre, et maintenant. Accessible par des moyens de détection plus puissants que nos yeux, comme les grands télescopes (cela, nous le savons depuis l'époque de Galilée et de sa lunette). Mais aussi accessible par des moyens de

détection différents, qui ne sondent pas la lumière mais d'autres types de radiation. Et de ceci, nous commençons seulement à en entrevoir les possibilités : voir l'Univers différemment ou accéder à sa nature plus fondamentale.

Revenons à notre nuit étoilée. Chaque grain de lumière est appelé familièrement étoile, mais nous savons depuis longtemps que certains d'entre eux sont les planètes de notre propre système solaire : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Nous savons aussi depuis une centaine d'années que certains de ces points lumineux sont des galaxies, énormes accumulations d'étoiles. Notre propre étoile, le Soleil, fait partie d'un tel ensemble, la Voie Lactée, qui est notre galaxie. Parce que le Soleil est quelque peu à la périphérie de cette galaxie, nous voyons la Voie Lactée par la tranche. D'où sa forme étirée à travers le ciel. L'aspect laiteux est dû à la concentration d'étoiles dans cette direction : un lait d'étoiles. Nous voyons aussi des étoiles de la Voie Lactée dans d'autres directions, bien qu'elles soient plus dispersées. Toutes les étoiles que nous pouvons distinguer dans le ciel font partie de notre galaxie. D'autres points lumineux sont de nature *extragalactique*, c'est-à-dire localisés hors de notre galaxie. En fait, ce sont des galaxies à part entière : elles sont situées tellement loin que l'on ne peut discerner individuellement les étoiles qui les forment.

La découverte de la nature extragalactique de ces sources de lumière – en un mot, la découverte d'autres galaxies – s'est accompagnée dans les années 1920 d'une découverte encore plus surprenante : ces galaxies s'éloignent de nous. Ainsi, l'Univers qui nous avait frappés par son apparente immuabilité est au contraire dynamique. Et puisque toutes les galaxies s'éloignent de nous, il faut bien en déduire que, si nous ne sommes pas à un endroit privilégié, c'est la structure même de l'Univers qui est dynamique : toute galaxie s'éloigne de toute autre galaxie. On traduit ceci en disant que *l'Univers est en expansion*.

C'est en fait la lumière qui nous a fourni la preuve de cette expansion. On peut étudier les corps présents dans chaque astre lumineux en analysant la lumière qu'ils émettent, en particulier sa couleur (liée à sa fréquence). Or, les travaux de Lemaître et Hubble dans les années 1920 montrent que la lumière émise par des corps connus est légèrement



décalée en fréquence vers le rouge, un effet qui serait dû à leur mouvement relatif par rapport à nous. Les objets astrophysiques qui les émettent sont en mouvement par rapport à nous, et ce sont précisément les objets extragalactiques.

Mais la lumière a une autre propriété que sa couleur (fréquence) : elle a une vitesse finie. Et ceci a des conséquences tout à fait remarquables pour notre observateur du ciel étoilé. La lumière émise par un astre met un temps fini pour nous atteindre : 8,32 minutes du Soleil, 100 000 années des confins de la Voie Lactée, 2,5 millions d'années de la galaxie d'Andromède. Ceci signifie donc que, lorsque nous regardons le ciel, nous ne voyons pas l'Univers tel qu'il est aujourd'hui mais plutôt une série de clichés d'autant plus anciens qu'ils sont plus éloignés. Une sorte de film statique qui se déploierait devant nos yeux !

C'est un formidable avantage pour celui qui s'intéresse à l'histoire de l'Univers : celle-ci se déroule sous nos yeux, ici et maintenant. Les astres les plus éloignés que nous voyons aujourd'hui (à environ quatorze milliards d'années-lumière) sont dans l'état où ils étaient au tout début de l'Univers. Que sont-ils devenus aujourd'hui ? Pour le savoir, il faudrait attendre encore quatorze milliards d'années pour que la lumière qu'ils émettent actuellement nous atteigne. À l'inverse, un observateur dans la galaxie d'Andromède voit aujourd'hui la Terre telle qu'elle était il y a 2,5 millions d'années, c'est-à-dire au moment de l'apparition d'*Homo erectus*.

C'est donc une véritable coupe à travers l'espace et le temps que nous fournit la lumière des étoiles et des galaxies. À nous ensuite de reconstituer l'Univers dans son intégralité spatiale et temporelle, un peu comme les cernes d'un tronc fraîchement coupé nous permettent de reconstruire l'histoire de l'arbre et de son environnement.

Mais qu'est-ce qui est responsable de l'expansion de l'Univers ? D'où vient l'énergie nécessaire pour dilater les distances ? La réponse nous est donnée par Einstein. En 1915, il cherche à écrire un système d'équations qui unifierait la description des phénomènes gravitationnels dans le cadre de sa théorie de la relativité restreinte, conçue dix ans auparavant. Ce seront les fameuses équations d'Einstein qui quantifient la déformation de l'espace-temps sous l'effet d'une masse, ou plus

généralement d'une concentration d'énergie, et permettent de calculer la trajectoire d'un objet près d'un corps très massif. Elles forment le cœur de ce qu'on appelle la théorie de la relativité générale.

Einstein cherche très rapidement à appliquer ces équations, non pas seulement à des objets (des astres par exemple) en interaction gravitationnelle, mais à l'Univers tout entier. Et précisément, des solutions existent pour lesquelles l'Univers est en expansion. L'origine de l'expansion est donc à chercher du côté de la force gravitationnelle elle-même. En d'autres termes, l'Univers dans son ensemble est mû par la gravitation! En paraphrasant Aristote, selon qui Dieu était le premier moteur de l'Univers, nous pouvons dire que *la gravité est le premier moteur de l'évolution de l'Univers*.

Ceci amène à poser la question du statut de la force gravitationnelle au sein des forces fondamentales. C'est la première force dont nous prenons conscience : rappelons-nous de nos efforts de bambins pour nous dresser et marcher... Et pourtant, c'est la plus faible des forces fondamentales. La raison de cet apparent paradoxe? La force d'attraction est proportionnelle à la masse et nous vivons à proximité (très) immédiate d'un corps très massif, la Terre. Il y a fort à parier que si nous vivions sur un astéroïde, nous attacherions moins d'importance à la gravité. Parce qu'elle est très faible, c'est la force la moins bien connue. On sait qu'elle a une très longue portée : c'est pour cela qu'elle est le moteur de l'évolution de l'Univers. Mais elle est beaucoup moins connue à courte distance que l'autre force à longue portée, la force électromagnétique.

En fait, la théorie de la gravitation s'est développée de façon assez indépendante de celle des autres interactions au cours du xx<sup>e</sup> siècle. Alors que l'électromagnétisme permettait d'étudier l'univers microscopique, par exemple en envoyant des particules chargées sur de la matière, et d'y découvrir les lois de la mécanique quantique, la relativité générale a reçu un certain nombre de confirmations tout à fait convaincantes dans notre univers proche, disons dans le système solaire (courbure des rayons lumineux près du Soleil, mouvement des planètes).

L'exploration de l'infiniment petit s'est poursuivie pendant tout le siècle avec la découverte de la force nucléaire ou force nucléaire forte et de la force faible (responsable de certains types de radioactivité), et la mise au point d'accélérateurs de plus en plus puissants pour les étudier.

Puisque les particules circulent dans les accélérateurs à des vitesses proches de la vitesse de la lumière, il fallait réconcilier *mécanique quantique* et *relativité restreinte*, ce qui fut réalisé dans les années 1940-1950.

Il est apparu que les concepts développés dans le cadre de l'électromagnétisme se généralisaient à la description des forces faibles et fortes, ce qui a abouti à un schéma théorique unifié connu sous le nom de Modèle Standard. La confirmation de ce Modèle a été la découverte de la particule de Higgs au CERN en 2012, dernière brique élémentaire nécessaire à la cohérence du Modèle.

Mais la relativité générale, théorie de la gravitation, s'est développée en parallèle de façon essentiellement indépendante, principalement par des travaux théoriques sur les singularités. Ces singularités sont des comportements « pathologiques » de la théorie, soit dans un passé très lointain (le fameux Big Bang), soit lors de l'écroulement gravitationnel d'une étoile (les non moins fameux trous noirs). Si certains phénomènes, comme l'évaporation des trous noirs identifiée par Stephen Hawking, ont certains aspects quantiques, la relativité générale se refuse toujours à un traitement quantique. Est-ce une théorie qui est de façon inhérente irréconciliable avec la théorie quantique, ou bien faut-il modifier les lois de la mécanique quantique pour y intégrer la théorie de la gravitation ?

Dans les années 1970-1980, un rapprochement s'est toutefois opéré entre les deux théories. Du côté des trois forces non gravitationnelles, c'était la marche vers l'unification et la possibilité, qualifiée de grande unification, que forces électromagnétique, faible et forte ne soient que les avatars à basse énergie d'une force unique qui ne serait détectable qu'à de très hautes énergies. Du côté de la gravitation, c'était la prise de conscience que, plus on remonte dans le temps, et plus l'Univers est chaud et dense, et se réduit à une soupe de particules élémentaires. Or l'intensité de la force gravitationnelle augmente avec la température ; la conséquence est que, dans les tout premiers instants de l'Univers, l'interaction gravitationnelle entre particules élémentaires était aussi forte que les autres (contrairement à l'époque présente où nous avons souligné combien elle est plus faible que les autres forces), et devait donc être soumise aux lois de la mécanique quantique. Toutes les forces fon-

damentales connues, y compris la gravitation, seraient-elles des aspects différents d'une seule force unificatrice ?

Un problème majeur a toutefois mis en exergue la difficulté de réconcilier gravitation et physique quantique. C'est le problème de *l'énergie du vide*. En théorie quantique, chaque système a un état fondamental, qu'on appelle familièrement le vide, à partir duquel se construisent les autres états de la théorie. L'Univers lui-même aurait son état du vide. Cet état quantique est le siège de fluctuations (quantiques) qui lui confèrent une énergie non nulle. Or, dans le contexte de la relativité générale, chaque forme d'énergie déforme l'espace et le temps, et est donc en principe mesurable. En particulier, l'énergie du vide. Un calcul rapide utilisant les grandeurs caractéristiques de la *physique quantique* et de la *relativité générale* prédit une énergie du vide incommensurablement trop grande (120 ordres de grandeur !) par rapport à ce qui est compatible avec l'observation de l'Univers. Autant dire que nous n'avons pas encore la théorie qui associe relativité générale et physique quantique. L'unification ultime de la *gravitation* et des *autres interactions fondamentales* demandera certainement à reconsidérer de façon fondamentale les deux théories, relativité générale et mécanique quantique. À la fin des années 1990, le sentiment général était que, le jour où la théorie unificatrice serait identifiée, elle conduirait à l'annulation automatique de l'énergie du vide.

Toutefois, cette même énergie du vide est nécessaire pour expliquer une expansion très rapide (exponentielle) de l'Univers juste après le Big Bang. C'est la phase dite d'*inflation* qui permet d'expliquer pourquoi l'Univers que nous observons aujourd'hui a des propriétés si homogènes dans toutes les directions : il serait issu d'une toute petite région de l'espace-temps.

L'histoire s'est accélérée au tournant du siècle avec, en 1999, la découverte d'une *accélération de l'expansion* de l'Univers : les explosions de supernovæ d'un certain type semblent d'autant moins brillantes qu'elles sont plus anciennes. Puisqu'elles avaient été choisies précisément pour la stabilité de leur luminosité, elles sont donc situées plus loin que prévu, ce qui veut dire que l'expansion de l'Univers depuis leur explosion a été plus rapide qu'anticipé : elle a accéléré. L'aspect le plus remarquable de cette découverte

vient du fait que tous les ingrédients connus de l'Univers, matière visible ou sombre (la fameuse matière noire), rayonnement électromagnétique et neutrinos ont tendance à ralentir l'expansion de l'Univers. Si l'Univers subit actuellement une phase d'accélération de son expansion, c'est donc qu'une composante encore inconnue, rapidement baptisée *énergie sombre*, est en train de prendre le pas sur les composantes connues.

Qu'est-ce que cette énergie sombre? L'énergie du vide est pour le moment la meilleure candidate pour expliquer la nouvelle phase d'accélération. Quel sort est alors réservé à notre Univers? Une expansion de plus en plus rapide?

Toutes ces questions ont un intérêt brûlant, en particulier depuis qu'en 2013 les résultats de la mission Planck de l'Agence Spatiale Européenne sont venus conforter les prédictions des modèles d'inflation : il semble que les structures observées dans le fond cosmologique, cette première lumière émise 380 000 ans après le Big Bang, soient bien les vestiges de fluctuations émises au sein du vide quantique pendant la phase d'inflation.

Et, par la même occasion, nous avons atteint le nœud du problème tapi au cœur de l'interface entre les deux grandes théories de la physique du  $xx^e$  siècle, la mécanique quantique et la relativité générale. Mais cette fois-ci, outre les études théoriques, nous avons un ensemble de données observationnelles très riche et qui va continuer à s'enrichir : un large programme d'observation est mis en place au sol et dans l'espace pour essayer d'identifier la nature de l'énergie sombre.

Toutefois, le plus extraordinaire restait à venir! Dès 1916, Einstein avait prédit l'existence d'*ondes gravitationnelles* : de même qu'une charge électrique qui se déplace produit une onde électromagnétique, une masse qui se déplace (comme dans une explosion par exemple) produit une courbure de l'espace-temps qui se propage, un peu comme la chute d'une pierre dans une mare provoque des rides à sa surface. Quand ces ondes traversent le laboratoire, la courbure de l'espace-temps semble mettre en mouvement les objets les uns par rapport aux autres. Parce que la force gravitationnelle est très faible, cet effet est extraordinairement petit mais les techniques de mesure d'accélération ont fait de tels progrès qu'il est devenu envisageable de mesurer ces mouvements. Un réseau d'antennes gravitationnelles s'est mis en place à travers le monde

(les États-Unis et l'Europe, bientôt rejoints par le Japon et l'Inde), pour permettre de détecter ces ondes gravitationnelles. Le 11 février 2016, coup de tonnerre dans le ciel gravitationnel : on annonce la découverte par le détecteur LIGO d'une onde gravitationnelle provenant de la fusion de deux trous noirs... il y a 1,3 milliard d'années. Ceci clôt cent ans de quête, mais d'une certaine façon un voile se déchire et nous ouvre une vertigineuse perspective sur l'Univers gravitationnel.

L'exploration va maintenant se poursuivre avec un réseau plus large d'antennes au sol: le détecteur européen Virgo devrait rapidement fonctionner dans sa version avancée, suivi par les détecteurs japonais et indiens. Et l'Agence Spatiale Européenne a décidé fin 2013 de mettre en place dans les vingt ans qui viennent un observatoire d'ondes gravitationnelles dans l'espace. La mission spatiale LISAPathfinder, lancée en 2015 pour tester les principales technologies, en a déjà confirmé la validité.

Alors que pendant des siècles, la lumière nous a permis d'observer et de comprendre l'Univers, nous allons bientôt être en mesure de l'observer grâce aux ondes de gravitation, de cette même gravitation dont nous avons découvert qu'elle est le premier moteur de l'Univers.

C'est à une meilleure compréhension de ce moment clé pour l'évolution des concepts les plus fondamentaux de l'Univers que vous invite ce livre. Moment clé parce qu'il résulte de cent ans de réflexion sur la théorie de la relativité générale, première théorie globale de la gravitation. Mais aussi parce qu'un certain nombre de découvertes majeures, toutes associées au rôle de la gravitation dans l'Univers, ont eu lieu dans les quinze dernières années. Moment clé enfin parce qu'un programme global d'observation de l'Univers gravitationnel se met en place, qui devrait en révolutionner notre compréhension.

Les questions les plus fondamentales sont abordées par ces théories et ces observations. Des questions dont il est important que chacun de nous prenne conscience car elles devraient faire évoluer la perception de notre place dans cet Univers. C'est pourquoi ce livre s'adresse à tous ceux qui sont curieux de ces questions, qu'ils aient une formation scientifique ou non. Ils y rencontreront beaucoup de notions ou de concepts qui leur étaient inconnus, et l'inconnu paraît souvent complexe, mais un des rôles du physicien est d'introduire de l'ordre dans cette complexité, c'est-à-dire de la simplicité...

# LA FORCE GRAVITATIONNELLE, CETTE INCONNUE

## *Qu'est-ce que la gravitation ?*

Notre expérience immédiate de la force gravitationnelle est la chute des corps, c'est-à-dire la force de pesanteur, qui n'est rien d'autre que l'attraction gravitationnelle entre un corps et la Terre. C'est la force qui nous est la plus immédiatement perceptible. C'est la force à laquelle le petit enfant doit faire face pour se mettre debout. C'est probablement dans ce mouvement pour se dresser et lutter contre la pesanteur que se définit en partie notre spécificité d'être humain. C'est aussi à partir de l'expérience de la gravitation que le concept de force s'est forgé dans la science moderne.

Et pourtant la force gravitationnelle est la plus faible des quatre forces fondamentales : elle nous est immédiatement perceptible pour une simple raison conjoncturelle : la présence d'un corps très massif dans notre voisinage immédiat, la Terre. Si nous n'étions pas dans ce contexte très particulier, il est probable que nous aurions découvert la notion de force avec la force électrique. On peut d'ailleurs se livrer au petit jeu de savoir quel type de force pourrait appréhender un être en apesanteur loin de la Terre. J'imagine que ce serait probablement une force de frottement, comme par exemple la force de résistance qu'on éprouve en tournant une cuiller dans un pot de miel. De quelle nature

est cette force? Électrique : les frottements résultent des forces de liaison (de nature électrique) qui existent entre les molécules du corps qu'on déplace et celles du milieu environnant (la cuiller et le miel dans notre exemple).

C'est peut-être ici le moment d'explicitier la notion de force – ou interaction – fondamentale. *Une force fondamentale est décrite par une loi qui a la même forme en tout point de l'espace et à tout instant, c'est-à-dire qui est valable dans tout l'Univers.* On appelle aussi ces forces fondamentales des *forces élémentaires* parce qu'elles s'exercent, au sens strict, entre constituants *élémentaires* de la matière : ainsi la force électrique (ou force de Coulomb) s'exerce entre deux charges élémentaires, par exemple entre deux électrons.

Les forces entre deux corps matériels ne sont pas toutes élémentaires : elles sont souvent la combinaison de multiples forces élémentaires qui s'exercent entre leurs constituants élémentaires. Elles n'obéissent donc pas à des lois fondamentales, mais à des *lois empiriques* qui sont approximatives, et ne sont pas nécessairement applicables toujours et partout. Un exemple typique est donné par les forces de frottement. Imaginons cette fois que nous poussons une caisse sur un sol rugueux : la force de frottement qui s'oppose au mouvement résulte des multiples forces de Coulomb élémentaires entre les électrons de la caisse et ceux du sol (ces forces engendrent des liaisons entre les molécules de la caisse et celles du sol). Cette force va dépendre de multiples conditions : l'état de rugosité du sol, de la surface de la caisse, la vitesse de la caisse par rapport au sol, la température de la pièce... La loi qui va décrire cette force résultera de ces multiples paramètres et ne pourra être que de nature empirique.

La force électrique est au contraire une force fondamentale ; plus généralement, depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle où l'on a unifié la description des phénomènes électriques et magnétiques, on parle de force électromagnétique. La force gravitationnelle en est une autre. On a en fait identifié à l'heure actuelle quatre forces fondamentales : outre les deux déjà mentionnées (électromagnétique et gravitationnelle), la force nucléaire ou force forte, et la force associée à certains types de radioactivité ou force faible. Nous y reviendrons plus en détail au Chapitre 4.



Un bref historique de la façon dont les physiciens en sont venus à considérer la force gravitationnelle comme une force fondamentale apporte un éclairage particulier à cette notion. Il me permettra par ailleurs d'introduire un certain nombre de concepts qui vont nous accompagner tout au long de ce livre.

Si je lâche une bille de plomb et une plume, elles ne tombent pas de la même façon. Si je répète l'expérience dans l'eau ou dans l'huile, le mouvement de la bille sera différent... et la plume flottera. Il y a donc une influence du milieu, l'air dans un cas et l'eau ou l'huile dans l'autre. Aristote en déduisait que le milieu est nécessaire au mouvement et rejetait ainsi l'idée du vide : le mouvement y serait instantané ce qui est absurde. En fait, les aristotéliens distinguaient deux types de mouvements : le mouvement naturel (vers le haut ou vers le bas selon que le corps tient plus de l'air ou de la terre), et le mouvement forcé, c'est-à-dire sous l'action d'une force. Le mouvement des étoiles, qui ne semblent ni tomber ni s'éloigner puisqu'elles réapparaissent toutes les nuits, relève d'une catégorie spéciale : le mouvement circulaire, parfait et éternel, celui des sphères célestes. Selon Aristote, Dieu est le premier moteur, nécessairement immobile, qui cause le mouvement de tout l'Univers.

On fait habituellement remonter à Galilée la naissance de la physique moderne. En particulier pour son utilisation de l'expérimentation pour tester les hypothèses faites, une expérimentation aussi bien réelle que virtuelle, par la pensée. J'en donnerai quelques exemples, qui me permettront ensuite, quand nous aborderons des concepts plus difficilement testables concrètement, de les soumettre à des expériences de pensée pour en cerner plus précisément les contours.

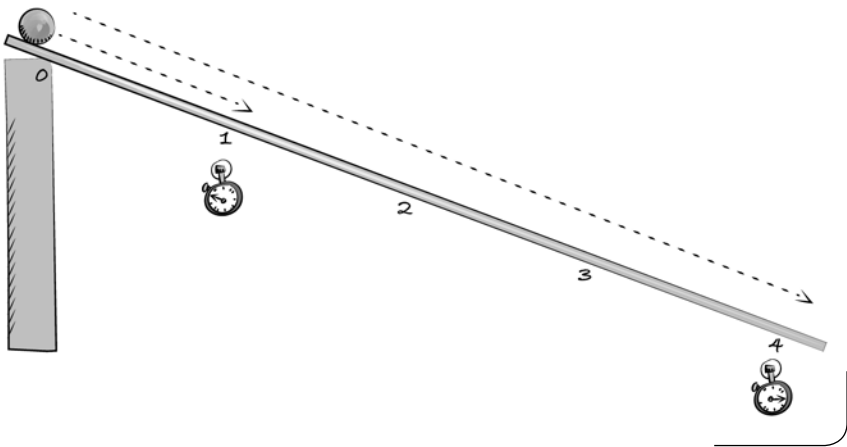
### *Galilée et l'universalité de la chute des corps*

En observant la chute des corps, Galilée constate qu'une difficulté de l'étude expérimentale du mouvement est sa brièveté : une chute libre d'une hauteur de 5 mètres dure à peine une seconde. Il utilise donc un dispositif simple pour la ralentir en faisant glisser le long d'une planche inclinée : plus l'angle avec l'horizontale est faible, et plus le mouvement est ralenti. Vous pourriez objecter qu'il va ainsi augmenter

les frottements, mais en testant plusieurs types de surface (rugueuse, vernissée, cirée, glacée, etc.), il peut en déduire l'effet des frottements et imaginer par la pensée une planche idéale pour laquelle les frottements seraient inexistants. Galilée conclut de ses expériences que le mouvement est universel (le même pour tous les corps) et de type accéléré, c'est-à-dire que la distance parcourue varie comme le carré du temps : c'est la caractéristique du mouvement d'un corps sur lequel s'exerce une force constante.

### **Le mouvement uniformément accéléré**

Pour vérifier que le mouvement de chute sur une planche inclinée est accéléré, il suffit de tracer cinq marques équidistantes sur la planche, repérées par les chiffres 0 à 4 de haut en bas. Lâchons une boule sans vitesse initiale à la position 0, et mesurons le temps de passage à la position 1 et à la position 4. Si la boule a mis deux fois plus de temps pour aller de 0 à 4 que de 0 à 1, c'est-à-dire pour franchir une distance quatre fois plus grande, le mouvement est accéléré : la distance parcourue (4) varie comme le carré de la durée (2).



J'en profite pour glisser ici ma propre contribution au domaine, quatre cents ans après Galilée. J'aime faire avec mes étudiants l'expérience suivante. Je prends d'une main un livre (de préférence

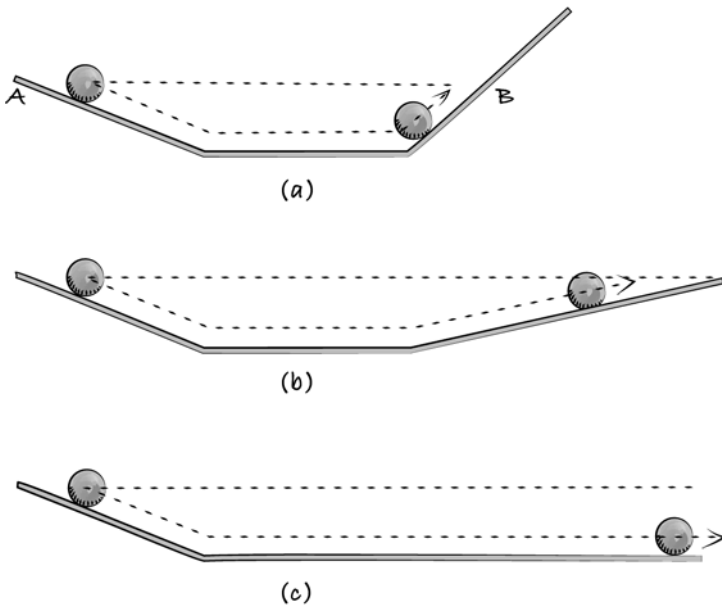
*Gravitation* de Misner, Thorne et Wheeler, surnommé « la bible de la relativité générale » : nous retrouverons ces trois physiciens américains par la suite) et de l'autre une feuille de papier et les laisse tomber simultanément. Pas de doute : *Gravitation* s'écrase au sol quand la feuille est encore en train de virevolter. Pour convaincre alors les étudiants de l'universalité de la chute des corps, je place le livre sur la feuille et les lâche : les deux atteignent le sol simultanément. Il y a bien sûr un étudiant malin qui fait remarquer que le livre a poussé la feuille. Alors voyons si la feuille peut pousser le livre, en la posant cette fois-ci dessus. Je vous laisse deviner la suite. Succès garanti.

Revenons à l'expérience de Galilée. Pour mieux juger de l'effet des frottements, je peux compliquer légèrement le dispositif en provoquant une remontée de l'objet avec une seconde planche inclinée B (Figure 1.1a). Moins il y a de frottements et plus l'objet remonte haut. Dans le cas idéal où il n'y aurait pas de frottement, l'objet remonterait à la même hauteur que sa position initiale. Dans cette limite, l'accélération (obtenue en divisant les distances parcourues par le carré du temps correspondant) du mouvement descendant le long de la planche A tend vers une constante, environ  $10 \text{ m/s}^2$ , l'accélération de la pesanteur.

Plus j'abaisse la planche de droite et plus l'objet va loin pour retrouver la hauteur initiale (Figure 1.1b). Si je la rends horizontale (Figure 1.1c), l'objet devrait continuer son mouvement à vitesse constante (le poids est alors totalement compensé par la réaction de la planche), indéfiniment dans la limite idéale où les frottements seraient nuls.

Ceci nous permet de définir une caractéristique de l'objet qui est son inertie, c'est-à-dire sa capacité à résister aux variations de mouvement. Selon le *principe d'inertie*, un objet qui n'est soumis à aucune force (ou à des forces dont la résultante est nulle) est animé d'un mouvement uniforme, c'est-à-dire d'un mouvement à vitesse constante ou nulle.

Ce principe d'inertie est une conséquence d'un autre principe énoncé par Galilée, le *principe de relativité*. Les aristotéliens considéraient que la Terre est nécessairement immobile; sinon, disaient-ils, une balle lancée en l'air verticalement ne retomberait pas au même endroit, puisque la Terre aurait bougé pendant le temps de la chute. Galilée note



**Figure 1.1** De l'expérience des plans inclinés de Galilée à une première illustration du principe d'inertie.

En l'absence de frottements (expérience de pensée), la boule remonte à la hauteur de départ. Plus la planche B est inclinée et plus la boule va loin vers la droite (a, b). Si la planche est horizontale (c), la boule continue indéfiniment à vitesse constante.

qu'enfermé dans la cabine d'un navire, on ne peut faire d'expérience qui indiquerait si le navire est immobile ou en vitesse uniforme : les mouvements observés, par exemple celui d'une balle lancée dans la pièce, sont identiques dans les deux cas. Le principe de relativité galiléen énonce ainsi que les résultats des expériences, et donc les lois de la physique, sont identiques dans tous les systèmes de référence (tel un bateau) en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres.

On peut imaginer facilement que l'inertie d'un corps dépend de la quantité de matière qui le constitue. C'est en fait la masse du corps qui caractérise cette inertie. Un exemple pratique permet de comprendre pourquoi. Imaginez que vous deviez mettre en branle un chariot de mine. Vous préféreriez certainement le faire avec un chariot vide qu'un chariot plein de minerai. Pourquoi ? Naïvement, nous pourrions penser que c'est à cause de son poids que le chariot chargé appuie plus fortement sur les rails, mais le mouvement est horizontal et le poids est entièrement compensé par la réaction du rail. C'est en réalité la quantité de matière, mesurée par la masse, qui détermine la résistance au mouvement, c'est-à-dire l'inertie. Pour vous en assurer, essayez maintenant d'arrêter le chariot en mouvement. Si vous pensiez que le poids sur les rails agissait contre vous, il devrait cette fois vous aider. C'est pourtant le chariot vide qu'il est plus facile d'arrêter parce que sa masse, et donc son inertie, sont moindres.

La difficulté réside ici dans la confusion faite dans le langage courant entre masse et poids. Le physicien doit, lui, distinguer entre la force (le poids, mesuré en newton) et l'inertie (la masse, mesurée en kilogramme). Un dernier exemple : l'astronaute en apesanteur veut savoir si la boîte de sucre, elle aussi en apesanteur, est vide ou pleine. Pour cela il l'agite : plus elle résiste au mouvement et plus elle contient de sucre.

J'ai multiplié ici les exemples pour illustrer comment, à partir d'expériences réelles, mais aussi d'expériences de pensée, on peut à la fois identifier des concepts et mettre à l'épreuve des hypothèses physiques. C'est l'une des grandes leçons à tirer de l'approche moderne de Galilée, et que nous mettrons en application dans la suite de ce livre.