

QUAI DES SCIENCES

BRIAN **COX** et JEFF **FORSHAW**

POURQUOI

$E = MC^2$?

ET COMMENT ÇA MARCHE ?

DUNOD

SOMMAIRE

Avant-propos	IX
Chapitre 1. L'espace et le temps	1
Chapitre 2. La vitesse de la lumière	17
Chapitre 3. Relativité restreinte	33
Chapitre 4. L'espace-temps	49
Chapitre 5. Pourquoi $E = mc^2$?	87
Chapitre 6. Et pourquoi s'en préoccuper ?	119
Chapitre 7. L'origine de la masse	141
Chapitre 8. Déformation de l'espace-temps	181
Remerciements	201
Index	203

AVANT-PROPOS

Notre but est de décrire la théorie d'Einstein sur l'espace et le temps, de la manière la plus simple possible, tout en révélant sa beauté profonde. Cela nous permettra de parvenir à la fameuse équation $E = mc^2$ sans utiliser un niveau mathématique dépassant le théorème de Pythagore (ne vous inquiétez pas si vous n'en avez plus aucun souvenir, nous l'expliquerons aussi)... Tout aussi important, nous voulons que chaque lecteur de ce petit livre puisse voir comment les physiciens modernes pensent la nature, construisent des théories qui peuvent se révéler utiles, et vont parfois jusqu'à changer nos vies. En imaginant un nouveau modèle d'espace et de temps, Einstein a permis de comprendre ce qui fait briller les étoiles, a découvert la raison profonde pour laquelle les moteurs électriques et les générateurs fonctionnent et, finalement, a jeté les bases sur lesquelles toute la physique moderne repose. Ce livre se veut également provocateur et stimulant ; il ne s'agit pas de remettre en cause la physique elle-même : les théories d'Einstein sont très bien établies et soutenues par un grand nombre de preuves expérimentales, comme nous allons le découvrir au cours de notre développement. Cependant, le temps venu, les théories d'Einstein pourront être contraintes de céder la place à une représentation encore plus fidèle de la nature. En science, il n'existe pas de vérités éternelles, seulement des représentations du monde qui ne se sont

pas encore révélées fausses. Tout ce dont nous sommes sûrs, c'est que, pour l'instant, ces théories fonctionnent. Le côté provocateur de ce livre tient tout entier dans la refonte radicale que la science impose à notre vision du monde. Scientifique ou pas, chacun de nous a de l'intuition, et l'utilise pour déduire beaucoup de choses sur son environnement, à partir de son expérience quotidienne. Cependant, si nous soumettons nos conclusions à la lumière froide et précise de la méthode scientifique, nous découvrons souvent que la nature dément ces intuitions. Au fur et à mesure de notre progression, nous constaterons par exemple que, pour des objets se déplaçant à très haute vitesse, les notions de bon sens concernant l'espace et le temps sont bouleversées de fond en comble et remplacées par d'élégantes perspectives, totalement nouvelles et inattendues. Cette leçon est salutaire car elle incite à la prudence et doit inspirer un sentiment d'humilité respectueuse : l'univers est bien plus riche que ce que pourraient faire croire nos expériences quotidiennes. Enfin, plus merveilleux encore, la nouvelle physique, dans toute sa richesse, se caractérise par une élégance mathématique à couper le souffle.

Malgré sa difficulté apparente, la science n'est pas excessivement compliquée au fond. Elle consiste surtout à éliminer nos préjugés pour nous permettre d'observer le monde le plus objectivement possible. Elle accomplit cette tâche avec plus ou moins de succès, cependant peu de gens nieraient qu'elle parvient à expliquer le fonctionnement de l'univers. Il est malaisé d'apprendre à se méfier du « bon sens ». Pourtant, en nous amenant à accepter la nature telle qu'elle est, et non telle que nos idées préconçues nous la présentent, la méthode scientifique nous a ouvert l'accès à toutes les technologies modernes. En bref, la science, ça marche !

Dans la première moitié du livre, nous démontrerons l'équation $E = mc^2$. Par « démontrer », nous voulons dire que nous allons expliquer comment Einstein est parvenu à la conclusion que l'énergie est égale à la masse multipliée par le carré de la vitesse de

la lumière – c'est mot pour mot exactement ce que dit l'équation. Cette manière de lier la notion d'énergie et la notion de masse est pour le moins étrange. Réfléchissons-y un peu. Le genre d'énergie le plus familier est sans doute celui lié au mouvement : si vous recevez une balle de tennis en pleine figure, vous le sentirez ; un physicien dirait que la raquette de l'adversaire a communiqué de l'énergie à la balle, et que cette énergie est transmise à votre visage lorsque ce dernier arrête la balle. Quant à la masse, c'est une mesure de la quantité de matière contenue dans un objet. Une balle de tennis est plus massive qu'une balle de ping-pong, mais moins massive que la planète. Or, qu'est-ce que l'équation $E = mc^2$ exprime essentiellement ? Que l'énergie et la masse sont interchangeable, un peu comme on échange des monnaies, à un taux qui serait le carré de la vitesse de la lumière. Comment diable Einstein a-t-il pu aboutir à pareille conclusion, et que vient faire la vitesse de la lumière dans une équation reliant l'énergie et la masse ? Pour aborder ces questions, nous ne supposerons aucune connaissance scientifique préalable et nous éviterons les mathématiques autant que possible. Néanmoins, notre but est d'offrir au lecteur une réelle explication (et non pas une simple description). À cet égard, nous espérons apporter quelque chose de nouveau.

Dans les dernières parties du livre, nous constaterons à quel point l'équation $E = mc^2$ sous-tend notre compréhension des rouages de l'univers. Pourquoi les étoiles brillent-elles ? Comment l'énergie nucléaire concurrence-t-elle le charbon ou le pétrole ? Qu'est-ce que la masse ? Cette dernière question nous conduira dans le monde de la physique moderne des particules, au LHC (*Large Hadron Collider : Grand Collisionneur de Hadrons*), l'accélérateur de particules géant du CERN à Genève. Elle mettra également l'accent sur l'importance du mystérieux boson de Higgs, une

particule qui détiendrait l'explication de l'origine même de la masse, un objet de recherches très actives dans ce laboratoire. Le livre se terminera sur cette remarquable découverte d'Einstein : la structure de l'espace et du temps est en définitive à l'origine de la force de gravitation, ce qui se traduit par exemple par l'étrange idée que la Terre tombe « en ligne droite » autour du Soleil !

1

L'ESPACE ET LE TEMPS

Que signifient pour vous les mots « espace » et « temps » ? Peut-être vous représentez-vous l'espace comme cette zone obscure comprise entre les étoiles que vous observez dans le ciel par une froide nuit d'hiver ? Ou bien ce mot vous évoque-t-il, un vaisseau spatial scintillant, recouvert d'une pellicule dorée digne de Star Wars ou de Toy Story, glissant entre Lune et Terre ? Le temps, quant à lui, convoquera-t-il dans votre esprit le tic-tac de l'horloge ou bien les feuilles rougies par l'automne, quand la course annuelle du Soleil plonge dans l'ombre, pour la cinq milliardième fois, les régions de l'hémisphère Nord ? Nous avons tous une idée intuitive de l'espace et du temps qui sont l'étoffe même de notre existence. Nous nous déplaçons à travers l'espace sur la surface de notre planète bleue, tandis que s'égrène le tic-tac du temps.

Durant les dernières années du XIX^e siècle, une série d'avancées scientifiques, dans des domaines apparemment sans rapport entre eux, ont forcé les physiciens à remettre en question ces représentations simples et intuitives. Dans les premières années du XX^e siècle, Hermann Minkowski, un collègue d'Albert Einstein qui joua pour lui le rôle de tuteur, a sans doute éprouvé une certaine émotion en écrivant son article nécrologique désormais célèbre sur la défunte notion d'espace : « Désormais, l'espace en

lui-même ainsi que le temps en lui-même doivent s'évanouir tels de vulgaires spectres, et seule une sorte d'union des deux gardera une existence indépendante. » Qu'entendait donc Minkowski par « une sorte d'union » de l'espace et du temps ? Pénétrer le sens de cette affirmation presque mystique c'est saisir l'essence de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein – celle-là même qui engendra la plus célèbre de toutes les équations de la physique, $E = mc^2$, et poussa à jamais sur le devant de la scène la quantité désignée par c , la vitesse de la lumière, dans notre compréhension du théâtre de l'univers.

La théorie de la relativité d'Einstein est fondamentalement une description de l'espace et du temps, or, au centre de cette théorie, il y a le concept d'une vitesse particulière que rien dans l'univers ne peut dépasser, quelle que soit la puissance dont on dispose. Cette vitesse est la vitesse de la lumière, 299 792 458 mètres par seconde dans le vide. Voyageant à cette vitesse, un flash de lumière émis à partir de la Terre met une seconde pour arriver jusqu'à la Lune, huit minutes pour passer près du Soleil, 100 000 ans pour traverser notre propre galaxie, la Voie Lactée, et plus de 2 millions d'années pour atteindre sa voisine, Andromède. Cette nuit, les plus grands télescopes terrestres vont sonder l'espace obscur afin de capter l'antique lumière de lointains soleils, morts depuis longtemps, à la frontière de l'univers observable. Cette lumière a commencé son voyage il y a plus de 10 milliards d'années, bien avant que la Terre ne naisse de l'effondrement d'un nuage de poussière interstellaire. La vitesse de la lumière est énorme à l'échelle humaine, mais elle n'est pas infinie. Bien au contraire, lorsque confrontée aux immenses distances cosmiques entre étoiles, entre galaxies, la lumière est d'une lenteur décourageante ; elle est même suffisamment lente pour que, à l'aide de machines telles que le grand collisionneur de hadrons de 27 kilomètres au centre européen de physique des particules, le CERN à Genève,

nous puissions accélérer de très petits objets jusqu'à une vitesse extrêmement proche de la vitesse de la lumière.

Ce concept de limite cosmique imposée à la vitesse est bien étrange, et comme nous le découvrirons plus tard, identifier cette limite à la vitesse de la lumière se révèle réducteur. Cette limite joue un rôle bien plus profond dans l'univers d'Einstein. Il y a même une bonne raison pour que la lumière se déplace justement à cette vitesse-là. Nous en parlerons plus tard. Pour l'instant, qu'il nous suffise de mentionner que lorsque des objets s'approchent de la vitesse limite, des phénomènes curieux se produisent. Comment pourrait-on dans le cas contraire interdire à un objet de dépasser la vitesse limite ? C'est comme si une loi universelle de la physique empêchait votre voiture de dépasser 100 km/h, quelle que soit la puissance de son moteur, et que, contrairement au cas d'une limitation réglementaire, aucune force de police cosmique ne serait nécessaire pour la faire respecter. En effet, la structure même de l'espace et du temps est telle qu'il est absolument impossible de transgresser la loi, ce qui est heureux, sinon des conséquences désagréables se produiraient. Ainsi, nous verrons que s'il était possible de dépasser la vitesse de la lumière, il deviendrait envisageable de construire des machines capables de nous transporter dans le temps. Nous pourrions ainsi imaginer remonter vers une époque antérieure à notre naissance et, par accident ou à dessein, empêcher nos parents de se rencontrer. C'est un excellent thème de science-fiction, mais il n'y a aucun moyen de construire réellement un tel univers, et comme Einstein l'a montré, notre univers ne fonctionne pas comme ça. Espace et temps sont délicatement entrelacés, d'une façon telle que ces paradoxes ne peuvent se produire. Cependant, il y a un prix à payer : il faudra nous débarrasser de nos notions intuitives de l'espace et du temps. L'univers d'Einstein est celui où les horloges en mouvement ralentissent leur tic-tac, où les objets se contractent lorsqu'ils se déplacent, et où nous pouvons voyager des milliards

d'années durant à la seule condition que ce soit dans le futur. C'est un univers dans lequel la durée d'une vie humaine peut s'allonger presque indéfiniment. Nous pourrions observer la mort du Soleil, l'évaporation des océans et notre système solaire plongé dans une nuit perpétuelle. Nous pourrions assister à la naissance d'étoiles à partir de tourbillons de nuages de poussière, à la formation des planètes, et peut-être à l'apparition de la vie sur de nouveaux mondes encore informes. L'univers d'Einstein autorise ces voyages dans un futur même lointain, mais derrière nous, les portes du passé demeurent fermement closes.

Nous allons voir comment Einstein a été amené à concevoir une image aussi fantastique de l'univers, et comment cette image s'est révélée parfaitement exacte, et même nécessaire, à travers d'innombrables expériences scientifiques et applications technologiques. Par exemple, le système GPS de votre voiture tient compte du fait que le temps ne s'écoule pas au même rythme sur Terre et dans les satellites en orbite ! La vision d'Einstein est radicalement décapante : l'espace et le temps ne sont pas ce qu'ils paraissent.

Mais pour partager et apprécier la bouleversante vision d'Einstein, il va nous falloir accepter de réfléchir très profondément à l'espace et au temps, ces deux concepts au cœur de la théorie de la relativité.

Imaginez-vous, lisant un livre durant un voyage en avion. À 12 h 00, vous jetez un coup d'œil à votre montre, vous décidez de poser votre livre, de quitter votre siège, et de marcher dans l'allée pour discuter avec un ami, dix rangées plus loin. À 12 h 15, vous retournez à votre siège, vous vous asseyez et reprenez votre livre. Aucun doute, vous êtes revenu exactement au même endroit. Vous avez remonté les dix mêmes rangées pour revenir à votre siège, et vous avez retrouvé votre livre là où vous l'aviez laissé. Mais maintenant, pensez un peu plus attentivement à cette notion de « au même endroit ». Cela peut sembler totalement inutile,

tant le simple bon sens en donne une idée parfaitement claire. Quand nous téléphonons à un ami et que nous lui fixons un rendez-vous pour boire un verre dans tel ou tel café, nous savons bien que le café se trouvera « au même endroit » que la dernière fois ! Certes, le type de discussion que nous entreprenons dans ce chapitre peut paraître totalement oiseux, mais persistons dans ce sens, car en remettant en question des évidences, nous mettons nos pas dans ceux d'Aristote, Galilée, Newton et Einstein. Ainsi, comment définir précisément ce que nous entendons par « au même endroit » ? Sur la surface de la Terre, cela ne pose pas de problème particulier. Il suffit de se représenter sur notre globe une sorte de grille ou de quadrillage, les lignes de latitude et de longitude. Tout endroit peut alors être repéré par deux nombres, qui représentent sa position sur cette grille. Par exemple, la ville de Manchester au Royaume-Uni se situe à 53 degrés 30 minutes au nord de l'équateur, et 2 degrés 15 minutes à l'ouest du méridien de Greenwich. Ces deux nombres suffisent pour définir exactement la position de Manchester, puisque tout le monde s'accorde sur la localisation de l'équateur et la définition du méridien de Greenwich. Généralisons : pour définir n'importe quel point, sur la surface de la Terre ou au-dessus d'elle, il suffit d'imaginer une grille tridimensionnelle, s'étendant vers le haut à partir de la surface. Cette grille peut même être prolongée vers le bas, vers le centre de la Terre et au-delà, de l'autre côté de la Terre. On peut ainsi repérer tout point par rapport à la grille, que ce soit en l'air, à la surface, ou sous Terre. En fait, cette technique ne se limite pas à la Terre. La grille pourrait s'étendre vers l'extérieur au-delà de la Lune, au-delà de Jupiter, Neptune et Pluton, au-delà même du bord de la Voie lactée, jusqu'aux confins de l'univers. À l'aide de notre grille géante, potentiellement infinie, nous avons la possibilité de savoir où chaque chose se trouve et, comme dirait Woody Allen, c'est bien utile quand on a perdu son stylo... Notre grille définit donc une arène dans laquelle se trouve

tout ce qui existe, une sorte de boîte géante contenant tous les objets de l'univers. Dès lors, il est bien tentant d'affirmer : cette arène, cette boîte, c'est cela l'espace.

Mais revenons d'abord à la question de ce qu'on entend par « au même endroit », et reprenons l'exemple de l'avion. Nous avons supposé que, à 12 h 00 puis à 12 h 15, nous nous étions retrouvés au même point de l'espace. Et pourtant, imaginez comment la séquence des événements apparaît pour une personne située au sol, qui regarde l'avion. Elle le voit passer au-dessus d'elle à 800 km/h ; elle dirait que, entre 12 h 00 et 12 h 15, vous vous êtes déplacé de 200 km, et que vous n'êtes évidemment pas revenu « au même endroit ». Qui a raison ? Qui est en mouvement ? Qui est immobile ?

Il est tout à fait légitime d'hésiter devant ces questions simples en apparence : Aristote, l'un des plus grands esprits de la Grèce antique, aurait par exemple donné une réponse radicalement fautive. Il aurait affirmé, sans doute possible, que c'est vous, le passager de l'avion, qui êtes en mouvement. En effet, Aristote voyait la Terre au centre de l'univers. Selon lui, le Soleil, la Lune, les planètes et les étoiles tournaient autour d'elle, sur cinquante-cinq sphères transparentes concentriques, emboîtées comme des poupées russes. Il partageait ce concept intuitivement convaincant de l'espace comme une arène, ou une boîte, dans laquelle on trouverait la Terre et les sphères. Cette image de l'univers constitué de la Terre et d'un ensemble de sphères paraît ridicule aujourd'hui. Mais supposez que personne ne nous ait dit que la Terre tourne autour du Soleil, que les étoiles sont des soleils lointains, des milliers de fois plus brillants que le nôtre, mais à des milliards de milliards de kilomètres. Percevriions-nous que la Terre est en mouvement dans un univers incroyablement grand ? Notre vision actuelle du monde fut loin d'être aisée à construire, car elle va souvent à rebours de nos intuitions. Si cette image de l'univers échafaudée par des milliers d'années d'expérience et de réflexion était si évidente, alors les

plus grands esprits du passé, comme Aristote, l'auraient élaborée eux-mêmes. De même, si tel ou tel concept de ce livre vous semble difficile, rassurez-vous : les plus grands esprits de l'antiquité en auraient également convenu.

Pour trouver la faille dans le raisonnement d'Aristote, commençons par accepter un instant son point de vue, et voyons où cela nous mène. Selon lui, tout l'espace contient nécessairement une grille imaginaire centrée sur la Terre, grâce à laquelle on peut repérer la position de toute chose, et définir avec certitude ce qui est en mouvement ou ce qui est immobile. Si l'on accepte cette image de l'espace comme la boîte qui contient tout, la Terre immobile en occupant le centre, alors il devient clair que vous, le passager de l'avion, avez changé de place dans la boîte, alors que la personne qui regardait voler l'avion est restée immobile à la surface de la Terre, elle-même fixe. En d'autres termes, il existe un mouvement absolu, et du même coup, un espace absolu. Un objet est en mouvement absolu s'il change de place dans l'espace au cours du temps, par rapport à la grille imaginaire fixée au centre de la Terre.

Le problème avec cette image, bien sûr, est que la Terre n'est pas immobile au centre de l'univers : c'est une boule qui tourne en orbite autour du Soleil. De fait, la Terre se déplace à plus de 100 000 km à l'heure par rapport au Soleil. Quand vous vous couchez le soir et que vous dormez durant huit heures, vous avez parcouru plus de 800 000 km à votre réveil. Vous pourriez alors affirmer que, dans 365 jours environ, votre chambre retrouvera exactement le même point de l'espace, puisque la Terre aura bouclé une orbite complète autour du Soleil. On pourrait ainsi se contenter de modifier un peu notre représentation, tout en sauvegardant l'essentiel du point de vue d'Aristote : il suffirait de choisir le Soleil comme centre de la grille. Cette idée est assez simple, mais elle n'est pas bonne non plus, car le Soleil lui-même tourne autour du centre de la Voie Lactée. La Voie lactée est

notre île locale, de plus de 200 000 millions de soleils. Comme vous pouvez l'imaginer, elle est immensément grande, et il faut un certain temps pour en faire le tour. Le Soleil, avec la Terre à sa suite, se déplace autour de la Voie Lactée à près de 800 000 km/h, à une distance de 250 millions de milliards de kilomètres du centre. À cette vitesse, il faut 226 millions d'années pour parcourir une orbite. Bon, peut-être suffirait-il d'un pas de plus pour sauver le point de vue d'Aristote. Nous pourrions décider de placer le centre de la grille au centre de la Voie Lactée : si par exemple vous êtes dans votre lit, imaginez ce qui se passait, la dernière fois que la Terre était « ici », à ce point très précis de l'espace. Un dinosaure était en train de paître paisiblement, dans la lumière du petit matin, mangeant des plantes préhistoriques, à l'emplacement même de votre chambre. Mais attention, c'est encore faux : en réalité, les galaxies elles-mêmes s'enfuient les unes par rapport aux autres, et plus elles sont lointaines, plus grande est leur vitesse de déplacement. Il est donc évident que, vu la complexité de notre mouvement parmi les innombrables galaxies de l'univers, ramener celui-ci à une conception simple est impossible.

La vision aristotélicienne d'une grille immobile fixée « quelque part » est donc confrontée à une difficulté considérable : comment définir exactement ce qu'on entend par le mot « immobile » ? En d'autres termes, il se révèle impossible de savoir où mettre le centre de la grille imaginaire permettant de définir la position d'un point quelconque, et donc de trancher entre ce qui est immobile et ce qui est en mouvement. Aristote lui-même n'a jamais eu à affronter ce problème, car sa conception d'une Terre immobile, entourée de sphères en rotation, n'a jamais été sérieusement contestée durant près de 2 000 ans. Certes, cette conception aurait dû être remise en question, mais comme nous l'avons déjà dit, ces choses sont loin d'être évidentes, même pour les plus grands esprits. Claudius Ptolemaeus, connu plus communément sous le nom de Ptolémée, travaillait à la grande Bibliothèque d'Alexandrie en Égypte, au

II^e siècle. C'était un observateur attentif du ciel nocturne, et il s'inquiétait du mouvement céleste apparemment étrange des cinq planètes alors connues (en grec, « planêtês astêrês » signifie « astre errant »). Observées de la Terre sur plusieurs mois, elles ne suivent pas un chemin régulier mais semblent effectuer des boucles dans le ciel. Cet étrange ballet est appelé mouvement rétrograde. Il était connu plusieurs milliers d'années avant Ptolémée. Ainsi, les anciens Égyptiens avaient décrit Mars comme la planète « qui va à reculons ». Ptolémée était d'accord avec Aristote pour affirmer que les planètes tournent autour d'une Terre immobile, mais pour expliquer le mouvement rétrograde, il a dû imaginer de lier les planètes à de petites roues décentrées en rotation, les épicycles, à leur tour attachées aux sphères tournantes. Ce modèle était loin d'être élégant, il était même plutôt compliqué, quoique parfaitement capable de rendre compte du mouvement des planètes dans le ciel nocturne. La véritable explication du mouvement rétrograde dut attendre le milieu du XVI^e siècle, quand Nicolas Copernic proposa l'explication plus élégante (et plus exacte) d'une Terre non plus immobile au centre de l'univers, mais en orbite autour du Soleil, comme les autres planètes. Les travaux de Copernic ne manquèrent pas de détracteurs et furent jugés contraires à la foi par l'Église catholique. L'ouvrage ne fut retiré de l'Index des livres interdits qu'en 1835 ! Les mesures précises effectuées par Tycho Brahé, puis les travaux de Johannes Kepler, de Galilée et de Newton, ont finalement établi que Copernic avait non seulement raison, mais que ces travaux permettaient de plus d'établir une théorie du mouvement des planètes, sous la forme de lois de Newton du mouvement et de la gravitation. Ces lois demeurèrent incontestées et rendirent compte aussi bien du mouvement des astres errants et de tous les objets soumis à la pesanteur, des obus d'artillerie aux galaxies en rotation, jusqu'à l'apparition de la théorie de la relativité générale d'Einstein en 1915.

Ces vues en constante évolution de la position de la Terre, des planètes et de leurs mouvements dans le ciel devraient servir de leçon à toute personne absolument convaincue de posséder un savoir certain sur quoi que ce soit. Il y a bien des faits de notre monde qui paraissent évidents à première vue, et l'un d'entre eux est que nous sommes immobiles, à l'endroit où nous sommes. Mais l'avenir ne manque jamais de nous ménager des surprises. Rien d'étonnant à ce que la nature contredise les intuitions d'une tribu d'observateurs, descendants de singes constitués essentiellement de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène, se baladant à la surface d'un monde rocheux, tournant en orbite autour d'une étoile très quelconque, ni jeune ni vieille, située dans une zone périphérique de la Voie Lactée ! Il est tout à fait envisageable, il est même parfaitement probable, que les théories de l'espace et du temps discutées dans ce livre se révéleront n'être que des approximations d'une théorie plus profonde, encore à découvrir. La science est une discipline qui glorifie l'incertitude, et qui y reconnaît même la clé de son succès.

Galileo Galilei, né vingt ans après que Copernic avait proposé son modèle d'univers centré sur le Soleil, étudiait de manière très approfondie la notion de mouvement. Sa vision était probablement la même que la nôtre : la Terre nous apparaît immobile, même si l'étude du mouvement des planètes dans le ciel démontre qu'il n'en est rien. Mais Galilée eut une intuition qui se révéla féconde : de ce paradoxe apparent, il fut capable de tirer une conclusion très générale. S'il nous semble que nous sommes immobiles, alors même que nous savons que nous sommes en mouvement autour du Soleil, c'est qu'il n'existe aucun moyen, aucun principe, permettant de trancher entre ce qui est à l'arrêt et ce qui est en mouvement. En d'autres termes, cela n'a aucun sens de parler de mouvement absolu, on ne peut parler que de mouvement relatif d'une chose *par rapport* à une autre. Il s'agit là d'une idée incroyablement importante. Elle pourrait sembler évidente en un sens, pourtant,

apprécier pleinement son contenu nécessite un peu de réflexion. On voit clairement, par exemple, que lorsque vous êtes dans l'avion avec votre livre, le livre n'est pas en mouvement par rapport à vous. Si vous le mettez sur la tablette en face de vous, une distance fixe, invariable, vous en séparera. Et bien sûr, par rapport à quelqu'un sur Terre, le livre se déplace en l'air avec l'avion. Mais l'intuition de Galilée va en réalité bien au-delà : il conclut que ces affirmations sont les seules possibles, c'est-à-dire qu'on ne peut parler que du mouvement du livre par rapport à vous qui êtes assis dans votre siège d'avion, ou par rapport au sol, ou par rapport au Soleil, ou par rapport à la Voie Lactée, mais toujours par rapport à *quelque chose*. L'idée de mouvement absolu est un concept inutile, et il convient de s'en délester.

Cela peut sembler provocant, profond seulement en apparence, un peu comme un oracle énigmatique. Dans ce cas, cependant, il se révèle d'une grande richesse, digne de la réputation de Galilée. Pour comprendre pourquoi, posons-nous la question de savoir si la grille d'Aristote, qui nous permettrait de savoir si quelque chose est en mouvement absolu, est utile dans une perspective scientifique. Ici « scientifiquement utile » signifie qu'il serait possible d'en tirer des conséquences observables, des effets détectables expérimentalement. Par « expérience », entendons toute mesure, de n'importe quelle sorte : mouvement d'un pendule, couleur de la lumière émise par une bougie, ou collision de particules subatomiques dans le grand collisionneur de hadrons du CERN (nous y reviendrons). Si une idée n'a pas de conséquence observable, elle ne sert à rien pour saisir le fonctionnement de l'univers, même si elle peut paraître psychologiquement indispensable à notre confort intellectuel.

Ce critère fournit un outil très puissant pour trier le bon grain de l'ivraie, dans un monde foisonnant d'idées et de conceptions de toutes sortes. Dans sa parabole de la théière en porcelaine, le philosophe Bertrand Russell illustre par une analogie la futilité de

s'accrocher à des concepts sans conséquences observables. Russell affirme qu'il est absolument certain qu'il existe, en orbite quelque part entre la Terre et Mars, une petite théière de porcelaine, trop petite pour être observée par les télescopes les plus puissants. Si un plus grand télescope était construit et que, après un examen approfondi (et fastidieux !) de l'ensemble du ciel, on n'observait nulle part la théière, Russell pouvait affirmer que la théière est juste un peu plus petite que prévu, mais qu'elle est bien là. C'est ce qu'on appelle « changer la règle du jeu » ou encore « déplacer le problème »... Bien que la théière puisse ne jamais être observée, il serait « incroyablement présomptueux » de la part de l'espèce humaine, selon l'argument malicieux de Russell, de douter de son existence, et il conviendrait donc de respecter cette opinion, aussi absurde qu'elle paraisse. L'objectif de Russell n'est pas de faire admettre le droit de chacun à concocter son délire personnel, mais de souligner qu'élaborer une théorie qui ne peut être ni prouvée, ni réfutée par l'observation, n'a rigoureusement aucun intérêt : on ne peut rien en conclure, quelle que soit la passion qu'on y mette. Inventer n'importe quel objet, ou n'importe quelle idée, s'il n'y a aucun moyen de l'observer directement ou indirectement ne fera jamais avancer la compréhension scientifique de l'univers. De même, l'idée de mouvement absolu ne signifierait quelque chose que si nous pouvions concevoir une expérience pour le détecter. Par exemple, nous pourrions mettre en place un laboratoire de physique dans un avion et effectuer des mesures de haute précision sur tous les phénomènes physiques imaginables, dans une dernière tentative courageuse pour détecter le mouvement. On pourrait observer les oscillations d'un pendule et mesurer leur durée, on pourrait faire des expériences sur des piles, des générateurs électriques et des moteurs, ou même sur des réactions nucléaires et détecter les rayonnements émis. En principe, doté d'un avion suffisamment grand, nous pourrions pratiquement reproduire toutes les expériences réalisées dans l'histoire de l'humanité. Le

point clé qui sous-tend ce livre, en totalité, et qui constitue l'une des pierres angulaires de la physique moderne est que, pourvu que l'avion ne soit pas en phase d'accélération ou de décélération, *aucune* de ces expériences ne mettra en évidence son mouvement. Même regarder par le hublot n'apporterait rien, car tout ce que nous pourrions observer serait que le paysage défile sous nos yeux, mais alors le contraire resterait possible : le sol bouge et nous sommes immobiles. Le mieux qu'on puisse dire serait : « nous sommes stationnaires par rapport à l'avion », ou « nous sommes en mouvement par rapport au sol ». C'est là le principe de relativité de Galilée : il n'existe pas de mouvement absolu, puisqu'on ne peut pas le détecter expérimentalement. Cela n'est pas choquant car nous le savions déjà, intuitivement : si nous sommes dans un train à l'arrêt, alors que le train du quai voisin se met en branle, nous éprouvons durant une fraction de seconde la sensation très nette que notre train vient de se déplacer.

Toute cette discussion peut sembler plutôt philosophique, mais elle concerne la nature profonde de l'espace et constitue la première étape sur le chemin des théories d'Einstein : puisqu'il est fondamentalement impossible de détecter le mouvement absolu, le concept d'une grille particulière définissant l'absence de mouvement doit être abandonné, ainsi que le concept d'espace absolu.

S'il était possible de définir une grille aristotélicienne particulière quadrillant tout l'univers, alors le mouvement repéré sur cette grille serait défini comme absolu. L'abandon de la notion de mouvement absolu implique ainsi de rejeter la possibilité même de cette grille. Mais alors, comment définir la position d'un objet dans l'espace ? En d'autres termes, où sommes-nous dans l'univers ? En l'absence de la grille d'Aristote, ces questions n'ont plus aucun sens. Les seules choses dont nous pouvons parler sont les positions relatives des objets les uns par rapport aux autres. Il n'existe aucun moyen de spécifier des positions absolues dans l'espace, et nous pouvons

BRIAN **COX** et JEFF **FORSHAW**

POURQUOI $E = MC^2$?

ET COMMENT ÇA MARCHE ?

Traduit de l'anglais par Guy Chouraqui

Savez-vous que vous voyagez à la vitesse de la lumière ? Et non seulement vous, mais votre chaise, votre table, votre maison, la Terre elle-même ? Bien sûr, nous ne parlons pas ici d'un voyage dans l'espace en trois dimensions, mais dans la structure profonde de l'univers : l'espace-temps. Vous trouvez cela difficile à croire ? Pourtant, c'est bien ce que nous dit la fameuse équation d'Einstein : $E = mc^2$!

En talentueux passeurs de savoirs, Brian Cox et Jeff Forshaw nous révèlent dans ce livre les mystères de la théorie de la relativité. Grâce à eux, même sans bagage mathématique, vous pourrez percer les secrets de l'équation la plus célèbre du monde !

BRIAN COX

Physicien, professeur à l'université de Manchester, animateur d'une émission de vulgarisation scientifique sur la BBC.

JEFF FORSHAW

Physicien, professeur à l'université de Manchester.



6915490
ISBN : 978-2-10-057564-0

18,90 € Prix France TTC



DUNOD

dunod.com