

Max Tegmark

# Notre Univers mathématique

*En quête  
de la nature ultime du Réel*

Traduit de l'anglais (États-Unis)  
par Benoît Clenet

**EKHO**

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée  
en anglais en 2014 par Alfred A. Knopf,  
une division de Random House *LLC* sous le titre :

*Our Mathematical Universe:  
My Quest for the Ultimate Nature of Reality.*

*Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality*, first edition was originally published in English in 2014 by Alfred A. Knopf, a division of Random House LLC.

© 2014 by Max Tegmark

Couverture : Delphine Dupuy

© Dunod, Paris, 2014, pour la traduction française,  
2018 pour cette édition  
11 rue Paul Bert 92240 Malakoff  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)  
ISBN 978-2-10-077981-9

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

---

Je suis profondément reconnaissant envers tous ceux qui m'ont encouragé et aidé à écrire ce livre, à savoir :

- Ma famille, mes amis, mes professeurs, mes collègues et collaborateurs pour leur soutien et l'inspiration qu'ils m'ont transmise depuis des années ;
- Maman pour avoir su partager sa passion et sa curiosité pour les grandes questions sur la vie ;
- Papa pour m'avoir fait part de sa fascination et de sa clairvoyance sur les mathématiques et leur signification ;
- Mes fils, Philip et Alexander, pour m'avoir posé toutes ces grandes questions sur le monde et pour avoir, sans le vouloir, enrichi ce livre en anecdotes ;
- Tous les férus de science de par le monde qui m'ont sollicité au cours des ans avec des questions, des commentaires et des encouragements à poursuivre et publier mes idées ;
- Mes agents, John et Max Brockman, pour m'avoir convaincu d'écrire ce livre et avoir pu concrétiser ce projet ;
- Tous ceux ayant corrigé des parties du manuscrit, à savoir maman, mon frère Per, Josh Dillon, Marty Asher, David Deutsch, Louis Helm, Andrei Linde, Jonathan Lindström, Roy Link, David Raub, Shevaun

Mizrahi, Mary New, Sandra Simpson, Carl Shulman et Jaan Tallinn ;

- Les superhéros pour leurs commentaires sur des épreuves du livre, notamment Meia, papa, Paul Almond, Julian Barbour, Phillip Helbig, Adrian Liu, Howard Messing, Dan Roberts, Edward Witten et mon éditeur, Dan Frank ;
- Mais par-dessus tout, ma femme chérie Meia, ma muse et partenaire de ce voyage, en qui j'ai puisé plus d'encouragement, de soutien et d'inspiration que j'en ai jamais rêvé.

## Qu'est-ce que la réalité ?

---

*[...] les arbres sont essentiellement constitués d'air. Lorsqu'ils s'embrasent, ils retournent dans l'air, et dans la chaleur brûlante dégagée on retrouve celle du Soleil qui a été nécessaire pour transformer l'air en arbre. De même, la cendre représente l'infime résidu de ce qui ne provient pas de l'air, mais plutôt de la terre solide.*

Richard Feynman

*Il y a plus de choses sur la terre et dans le ciel, Horatio, qu'il n'en est rêvé dans votre philosophie.*

William Shakespeare, *Hamlet*, acte 1, scène 5

### L'illusion de la réalité

Une seconde plus tard, j'étais mort. Je cessai de pédaler puis écrasai les freins, mais il était trop tard. Phares. Barrière. Quarante tonnes d'acier rugissaient furieusement, à l'instar d'un dragon des temps modernes. J'entrevis furtivement la panique dans le regard du chauffeur du camion. J'avais l'impression que le temps ralentissait. Des images de ma vie défilaient devant moi, et ma toute dernière pensée, vivant, fut « j'espère que c'est simplement un cauchemar ».

Malheureusement, je presentais au plus profond de mes entrailles que c'était la réalité.

Mais comment aurais-je pu savoir avec certitude que je ne rêvais pas ? Et si j'avais perçu, juste avant le choc, quelque chose qui ne pouvait se produire qu'au royaume des songes, par exemple Ingrid, mon institutrice décédée, en chair et en os, assise sur mon porte-bagages de vélo ? Ou si, cinq secondes plus tôt, un message d'avertissement avait surgi dans le coin supérieur gauche de mon champ de vision, avec les mots suivants « Êtes-vous sûr de vouloir sortir précipitamment de ce tunnel sans regarder à votre droite ? » inscrits au-dessus des deux boutons « Continuer » et « Annuler » ? Si j'avais visionné des films tels que *Matrix*, j'aurais pu commencer à me demander si toute ma vie n'était, finalement, qu'une simulation informatique, remettant en question certaines de mes hypothèses les plus fondamentales sur la nature de la réalité. Or rien de tel ne se produisit, et je mourus avec la conviction que mon malheur était bel et bien réel. Après tout, qu'est-ce qui peut être plus solide et tangible qu'un poids lourd de quarante tonnes ?

Cependant, toutes les choses ne sont pas telles qu'elles apparaissent au premier abord, et il en va de même pour les camions et la réalité. Ce type de suggestion ne provient pas uniquement des philosophes et des auteurs d'ouvrages de science-fiction, mais également des physiciens expérimentateurs. En vérité, ceux-ci savent depuis un siècle que l'acier solide est majoritairement constitué d'espace vide, car les noyaux atomiques qui représentent 99,95 % de la masse sont de minuscules billes qui occupent 0,0000000000001 % seulement du volume, et que ce quasi-vide ne paraît solide que parce que les forces électriques qui assurent la cohésion de ces

noyaux sont très puissantes. De surcroît, les mesures précises des particules subatomiques ont révélé qu'elles semblent capables de se trouver à différents endroits au même moment, une énigme célèbre résidant au cœur de la physique quantique (nous l'explorerons au chapitre 7). Or je suis composé de ces particules, donc si elles possèdent ce don d'ubiquité, ne le puis-je pas également ? En réalité, trois secondes environ avant l'accident, mon subconscient avait décidé, parce qu'il n'y a jamais de circulation à ce carrefour, qu'il suffisait de jeter un œil à gauche, où je tournais toujours pour regagner *Blackeborgs Gymnasium*, mon lycée suédois, au lieu de regarder aussi à droite par précaution. Ma décision brutale et fatale en ce matin de 1985 tenait à très peu de chose. Elle reposait sur un seul atome de calcium et sur son entrée dans une jonction synaptique particulière de mon cortex préfrontal, engendrant la transmission d'un signal électrique par un neurone spécifique capable de déclencher une cascade d'activités chez les autres neurones de mon cerveau, encodant collectivement le message « Ne t'inquiète pas ». Donc, si cet atome de calcium se trouvait initialement en deux endroits légèrement différents au même moment, une demi-seconde plus tard, mes pupilles auraient pointé dans deux directions opposées en même temps, deux secondes plus tard mon vélo aurait été situé simultanément en deux endroits, et en peu de temps, j'aurais été à la fois mort et vivant. Les plus éminents chercheurs en physique quantique débattent avec véhémence de cette question : notre monde se sépare-t-il effectivement en univers parallèles dotés d'histoires différentes, ou l'équation de Schrödinger, la loi toute-puissante du mouvement quantique, doit-elle être amendée d'une façon ou d'une autre ? Donc suis-je

réellement mort ? Je me suis tout juste sorti d'affaire dans cet univers présent, mais suis-je décédé dans un autre univers tout aussi réel où ce livre n'aurait jamais vu le jour ? Si je suis à la fois mort et vivant, pouvons-nous nous faire une autre idée de ce qu'est la réalité, de sorte qu'elle retrouve tout son sens ?

Si vous pensez que ce que je viens d'avancer est absurde et que les physiciens se sont embourbés dans des questions inextricables, alors la situation empire si nous considérons ma perception personnelle du récit. Si je suis présent en deux endroits distincts dans ces univers parallèles, alors l'un de mes avatars survivra. Si vous appliquez le même raisonnement à toutes les occasions futures où je pourrais mourir, il semble qu'il y aura toujours au moins un univers parallèle où je ne meurs jamais. Puisque ma conscience n'existe que là où je suis vivant, cela signifie-t-il que je sois subjectivement immortel ? S'il en est ainsi, vous sentirez-vous également subjectivement immortel, de même que le doyen de l'humanité ? Nous répondrons à ces interrogations dans le chapitre 8.

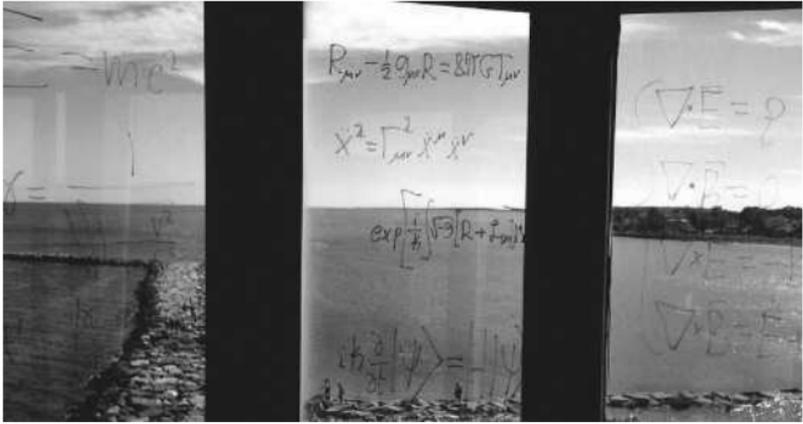
Serez-vous étonné d'apprendre que la physique a découvert que notre réalité est beaucoup plus étrange que nous venons de l'imaginer ? Bien entendu, cela n'est pas surprenant si nous considérons sérieusement l'évolution darwinienne ! L'évolution nous a légué de l'intuition uniquement pour les aspects de la physique ayant contribué à la survie de nos lointains ancêtres, tels que les orbites paraboliques des lancers de pierre (expliquant notamment notre inclination pour le rugby). Une Jane de la jungle méditant trop profondément sur l'ultime composition de la matière pourrait ne pas remarquer le tigre sournoisement dissimulé derrière elle, prêt à bondir, et se voir instantanément rayée de la carte du patrimoine génétique.

La théorie de Darwin propose donc la prédiction vérifiable stipulant qu'à chaque fois que nous tirons parti de la technologie pour entrevoir la réalité située au-delà de l'échelle humaine, notre intuition en gestation est battue en brèche. Nous avons maintes fois testé cette prédiction, et les résultats corroborent implacablement Darwin. Einstein avait compris qu'aux vitesses élevées, le temps ralentit, mais les esprits hermétiques du comité Nobel ont trouvé cette idée si saugrenue qu'ils refusèrent de lui accorder le prix Nobel pour sa théorie de la relativité. À basse température, l'hélium liquide peut s'écouler vers le haut. À température élevée, les particules en collision changent d'identité : à mon sens, la vision d'un électron heurtant un positron pour se transformer en boson Z semble aussi intuitive que celle où deux véhicules entrant en collision se transforment en un bateau de croisière. Aux échelles microscopiques, les particules surgissent frénétiquement en deux lieux en même temps, ce qui conduit aux problèmes quantiques mentionnés ci-dessus. Aux vastes échelles astronomiques – surprise ! – la bizarrerie frappe à nouveau : si vous appréhendez intuitivement toutes les facettes des trous noirs – je pense que vous êtes peu nombreux dans ce cas – alors vous devriez immédiatement poser ce livre puis publier vos découvertes avant que quelqu'un ne vous vole la vedette pour le prix Nobel sur la gravité quantique. Si nous considérons des échelles encore plus grandes, nous sommes confrontés à une réalité toujours plus étrange et considérablement plus sublime que tout ce que nous pouvons contempler à l'aide de nos meilleurs télescopes. Comme nous le verrons dans le chapitre 5, le paradigme décrivant les tout premiers instants de l'Univers, l'*inflation cosmologique*, suggère que l'espace n'est pas simplement réel, incommensurablement

réel, mais en réalité infini : il contient un nombre infini de copies exactes de vous, et encore plus de copies approximatives évoluant dans toutes les variantes possibles de votre vie dans deux types différents d'univers parallèles. Si cette théorie s'avère vraie, cela signifie que même si mon raisonnement fondé sur la physique quantique (où un de mes avatars n'arrive jamais à l'école) est défectueux, il existera un nombre infini d'autres Max sur des systèmes planétaires très éloignés dans l'espace, vivant des vies identiques jusqu'à cet instant fatidique puis décidant de ne pas regarder à droite.

En d'autres termes, les découvertes en physique mettent au défi certaines de nos idées les plus élémentaires sur la réalité *aussi bien* lorsque nous zoomons sur le microcosme *que* lorsque nous effectuons un zoom arrière sur le macrocosme. Tel que nous l'examinerons dans le chapitre 11, de nombreuses idées sur la réalité se trouvent bousculées même à l'échelle intermédiaire humaine si nous explorons les rouages de nos cerveaux par le truchement des neurosciences.

Enfin, nous savons que les équations mathématiques ouvrent une fenêtre sur les mécanismes de la Nature, comme l'illustre la métaphore de la figure 1.1. Mais pourquoi notre monde physique revêt-il une régularité mathématique si absolue, au point que l'éminent astronome Galilée proclamât que « le livre de la Nature est écrit en langage mathématique » et que le prix Nobel Eugene Wigner soulignât la « déraisonnable efficacité des mathématiques en physique » ? Ce mystère mérite une explication. Comme le suggère son titre, l'objectif principal de cet ouvrage est de répondre à cette question. Dans les chapitres 10 à 12, nous explorerons les relations fascinantes entre le calcul, les mathématiques,



**Figure 1.1** Lorsque nous contemplons la réalité au travers des équations de la physique, nous observons qu'elles décrivent des motifs réguliers. Or, à mon sens, les mathématiques sont plus qu'une fenêtre sur le monde extérieur : dans ce livre, je prétends que notre monde physique est non seulement *décrit* par les mathématiques, mais qu'il *est* mathématique – une structure mathématique devant être précisée.

la physique et l'intelligence humaine, et aborderons ma conviction peut-être insensée que notre monde physique n'est pas seulement *décrit* par les mathématiques, mais qu'il *est* mathématique, faisant de nous des éléments, rétrospectivement conscients, d'un objet mathématique géant. Nous verrons que cette idée introduit une collection inédite et ultime d'univers parallèles, si vaste et exotique que toutes les bizarreries susmentionnées deviennent insignifiantes, nous obligeant à renoncer à la plupart de nos concepts les plus profondément enracinés sur la réalité.

## Quelle est l'ultime question ?

Depuis la nuit des temps où nos ancêtres foulaient du pied la terre ferme, nous nous sommes sans cesse interrogés sur ce qu'est finalement la réalité, mettant en

exergue des questions existentielles profondes. *D'où proviennent toutes les choses ? Comment cela finira-t-il ? Quelle est la taille du cosmos ?* Ce questionnement est si fascinant que pratiquement toutes les cultures humaines de par le monde se sont évertuées à y répondre, transmettant leurs réponses d'une génération à la suivante sous la forme de mythes, de légendes et de doctrines religieuses élaborés sur la Création. Comme l'illustre la figure 1.2, ces interrogations sont si épineuses qu'aucun consensus global n'a pu émerger en guise de réponse. Au lieu d'une convergence de toutes les cultures vers une vision unifiée du monde pouvant potentiellement incarner l'ultime

Notre Univers est-il infini et vieux ?	Notre Univers perdurera-t-il éternellement ?	Y a-t-il d'autres univers ?	Si quelque chose a créé notre Univers, quelle est-elle ?
<p><b>OUI :</b> Hindouisme Bouddhisme</p> <p><b>NON :</b> Ahmadisme Apaches Azèques Babyloniens Bahaïsme Christianisme Égyptiens Grecs Hopis Islam Judaïsme Mayas Religion nordique Rastafarisme Sumériens Zoroastrisme</p>	<p><b>OUI :</b> Bouddhisme Grecs Hindouisme Religion nordique Zoroastrisme</p> <p><b>NON :</b> Ahmadisme Apaches Azèques Babyloniens Bahaïsme Christianisme Égyptiens Hopis Islam Judaïsme Mayas Rastafarisme Sumériens</p>	<p><b>OUI :</b> Hindouisme</p> <p><b>NON :</b> Ahmadisme Apaches Azèques Babyloniens Bahaïsme Bouddhisme Christianisme Égyptiens Grecs Hopis Islam Judaïsme Mayas Religion nordique Rastafarisme Sumériens Zoroastrisme</p>	<p><b>Dieu/dieux :</b> Apaches Azèques Babyloniens Christianisme Hopis Islam Judaïsme Mayas Sumériens Zoroastrisme</p> <p><b>Œuf :</b> Égyptiens Finlandais Grecs Hindouisme Taoïsme</p> <p><b>Éléments :</b> Mésopotamiens Égyptiens (eau) Religion nordique (feu/glace)</p> 

**Figure 1.2** Plusieurs des questions cosmologiques qui nous tarauderont tout au long de ce livre ont fasciné les penseurs à travers les siècles, mais aucun consensus global n'a pu émerger. La classification reproduite ci-dessus se fonde sur une présentation donnée par un étudiant du MIT, David Hernandez, pour mon cours de cosmologie. De telles taxinomies sont beaucoup trop simplistes et doivent être prises avec des pincettes : de nombreuses religions exhibent plusieurs branches et interprétations, et certaines d'entre elles tombent dans plusieurs catégories. Par exemple, l'hindouisme fait appel aux trois sources de création mentionnées : selon l'une des légendes, le dieu créateur Brahma (représenté) et notre Univers ont tous deux émergé d'un œuf qui lui-même proviendrait de l'eau.

vérité, les réponses ont largement divergé, et certaines de ces différences semblent pour le moins refléter des modes de vie dissemblables. Par exemple, dans la cosmogonie de l'Antiquité égyptienne, où le Nil préservait la fertilité des terres, notre monde émergeait de l'eau. Dans ma Suède natale, où, au contraire, le feu et la glace ont permis d'assurer la survie de l'espèce humaine, la mythologie nordique soutient, sans surprise, que la vie tire son origine de la glace et du feu.

D'autres grandes questions soulevées dès l'Antiquité sont tout aussi radicales. *Qu'est-ce qui est réel ? La réalité se limite-t-elle simplement à notre perception visuelle des choses ?* Non ! répondit Platon il y a plus de deux mille ans. Dans sa célèbre allégorie, il nous compare à des prisonniers condamnés à rester enchaînés à vie dans une caverne, face à une paroi vierge, observant les ombres formées par les choses évoluant dans notre dos, et finissant finalement par croire, à tort, que ces ombres incarnent toute la réalité. Platon avança que ce que nous désignons comme étant notre réalité quotidienne est, de façon analogue, une représentation limitée et déformée de la véritable réalité, et que nous devons nous affranchir de nos chaînes mentales pour commencer à l'appréhender.

En fin de compte, si ma carrière de physicien m'a enseigné une chose, c'est bien que Platon avait raison : la physique moderne a établi de façon irréfutable que l'ultime nature de la réalité n'est pas celle que l'on croit. Mais si tel est le cas, quelle est-elle ? Quelle est la relation entre la réalité interne de notre esprit et la réalité externe ? De quoi les choses sont-elles finalement constituées ? Comment tout ceci fonctionne-t-il ? Pourquoi ? Y a-t-il une signification sous-jacente, et si oui quelle est-elle ? Comme

l'exprima Douglas Adams dans sa saga humoristique de science-fiction *Le Guide du voyageur galactique* : « Quelle est la réponse à l'ultime question sur la Vie, l'Univers et tout le reste ? »

Les savants de toutes les époques ont proposé une palette éblouissante de réponses à la question « Qu'est-ce que la réalité ? » – tentant tantôt d'y répondre et tantôt de l'esquisser. En voici quelques exemples (cette liste ne prétend pas être exhaustive, et toutes les alternatives ne s'excluent pas mutuellement).

Dans ce livre (ainsi que dans toute ma carrière scientifique), j'ai personnellement tenté de répondre à cette question. La raison qui explique en partie la vaste panoplie de réponses proposées par les savants repose sur leurs différents choix d'interprétation de cette interrogation, donc je me dois de vous expliquer ma manière de l'interpréter et de l'aborder. Le terme *réalité* peut revêtir de nombreuses connotations différentes. Je l'emploie dans son acception de « nature ultime du monde physique extérieur qui nous entoure », et je suis fasciné par cette quête d'une meilleure compréhension. Donc, quelle est mon approche ?

Un soir, alors que j'étais au lycée, j'entamai la lecture du roman policier *Mort sur le Nil* d'Agatha Christie. Même si j'étais pleinement conscient du fait que mon réveil devait sonner à 7 heures du matin, je ne pus me résigner à refermer le livre tant que le mystère n'était pas résolu, c'est-à-dire jusqu'à 4 heures environ. J'étais inexorablement attiré par les récits de détectives depuis mon enfance, et lorsque j'eus environ douze ans, je montai un club de détectives avec mes camarades Andreas Bette, Matthias Bothner et Ola Hansson. Nous n'avons jamais capturé de criminel, mais cette

idée de résoudre des mystères a captivé mon imagination. Pour moi, la question « Qu'est-ce que la réalité ? » représente l'ultime énigme policière, et je considère avoir eu une chance incroyable de pouvoir passer tant de temps à tenter de la résoudre. Dans les chapitres qui suivent, je vous relaterai d'autres occasions où ma curiosité m'a tenu éveillé jusqu'aux premières heures du matin, parfaitement incapable de cesser ma lecture tant que le mystère demeurait sans réponse. Sauf que je ne lisais pas un roman, mais que j'étais en train d'écrire, et je couchais sur le papier une ribambelle d'équations mathématiques dont je savais qu'elles devaient finalement me livrer une réponse.

Quelques réponses à « Qu'est-ce que la réalité ? »	
La question possède une réponse ayant un sens.	Des particules élémentaires en mouvement.
	La Terre, le vent, le feu, l'air et la quintessence.
	Des atomes en mouvement.
	Des cordes en mouvement.
	Des champs quantiques dans l'espace-temps courbe.
	La théorie M (ou toute autre lettre, comme bon vous semble...).
	Une création divine.
	Une construction sociale.
	Une construction neurophysiologique.
	Un rêve.
	L'information.
	Une simulation (à l'instar de <i>Matrix</i> ).
	Une structure mathématique.
Le multivers de niveau IV.	

Quelques réponses à « Qu'est-ce que la réalité ? »	
La question recèle une réponse dépourvue de sens.	La réalité existe, mais nous, humains, ne pouvons pleinement l'appréhender : nous ne pouvons accéder à ce qu'Emmanuel Kant appelait « la chose en soi ».
	La réalité est fondamentalement insaisissable.
	Non seulement nous ne pouvons l'appréhender, mais nous ne pourrions pas la décrire si nous la connaissions.
	La science n'est rien d'autre qu'une histoire (réponse post-moderne de Jacques Derrida).
	La réalité réside entièrement dans notre cerveau (réponse constructiviste).
	La réalité n'existe pas (solipsisme).

Je suis physicien, et j'emprunte une approche de physicien au sujet des mystères de la réalité. À mon sens, nous devons tout d'abord nous poser les questions fondamentales telles que « Quelle est la taille de notre Univers ? » et « De quoi les choses sont-elles constituées ? » et devons les traiter exactement comme des énigmes policières : combiner des observations judicieuses et des raisonnements astucieux, et poursuivre sans relâche chaque indice où qu'il mène.

## Le voyage commence

Une approche physique ? N'est-ce pas la meilleure façon de rendre ennuyeux un sujet initialement excitant ? Lorsqu'une personne assise à côté de moi dans un avion me demande ce que je fais, j'ai deux alternatives. Si je me sens disposé à discuter, je réponds « astronome » ce qui ne manque pas de susciter une conversation intéressante<sup>1</sup>.

1. Cette conversation commence parfois ainsi : « Ah ! L'astrologie ! Je suis

Sinon, je réponds « physicien » si bien que les gens disent typiquement quelque chose comme « Oh ! J'étais nulle dans cette matière au lycée », ce qui me laisse tranquille pour le reste du vol.

En réalité, la physique était également la matière que *je* détestais le plus au lycée. Je me souviens toujours de mon tout premier cours de physique. Sur un ton monotone et soporifique, notre professeur annonçait que nous allions étudier la densité : c'est la masse divisée par le volume. Donc si la masse était ceci et le volume cela, nous devons calculer que la densité valait ceci par cela. À partir de ce moment, tous mes souvenirs restent confus. Hormis qu'à chaque fois que son expérience échouait, il maudissait l'humidité et marmonnait « cela marchait ce matin ! », tandis que certains de mes camarades ne comprenaient pas pourquoi leur expérience ne fonctionnait pas jusqu'à ce qu'ils découvrent que j'avais disposé par machiavélisme un aimant sous leur oscilloscope...

Lorsqu'est venu le temps de m'orienter après le lycée, je me suis détourné de la physique et des autres disciplines techniques pour me consacrer aux problèmes environnementaux, puis j'ai achevé mes études à l'École de commerce de Stockholm. J'aspirais à apporter ma modeste contribution afin de mieux préserver notre planète, et étais persuadé que le principal problème n'était pas le manque de solutions techniques, mais plutôt l'usage inapproprié de la technologie disponible. J'avais réalisé que la meilleure façon de bousculer le comportement des gens consistait à mettre à contribution leur porte-monnaie, et j'étais séduit

---

Vierge ». Lorsque je donne à la place la réponse plus précise « cosmologiste », j'obtiens des répliques telles que « Oui, la cosmétologie ! » – ce qui ne manque pas de déclencher des questions sur les crayons de maquillage et les mascaras.

par l'idée de créer des initiatives économiques afin de faire converger l'égoïsme individuel et l'intérêt de la communauté. Hélas ! Je déchantais rapidement, m'apercevant finalement que l'économie est en grande partie une forme de prostitution intellectuelle où vous êtes récompensé pour dire ce que le pouvoir en place souhaite entendre. Quel que soit le dessein d'un homme politique, il ou elle trouvera toujours un économiste qui lui conseillera d'agir de la sorte. Franklin Roosevelt souhaitait accroître la dépense pour relancer l'économie, il se fit donc conseiller par John Maynard Keynes, tandis que Ronald Reagan cherchait à réduire la dépense publique et écouta Milton Friedman.

C'est à cette époque que mon camarade de classe Johan Oldhoff me procura le livre qui a bouleversé ma vie : *Vous voulez rire, monsieur Feynman !* Je n'ai jamais rencontré Richard Feynman, mais c'est grâce à lui que j'ai bifurqué vers la physique. Même si ce livre ne traite pas vraiment de physique, s'étendant plutôt sur la manière de forcer un coffre-fort ou de draguer une femme, je pouvais lire entre les lignes et m'apercevoir que ce type était tout simplement passionné par la physique. Ce qui m'intrigua réellement. Si vous croisez un individu d'aspect médiocre marchant main dans la main avec une splendide créature, vous vous demanderez probablement si quelque chose vous échappe : peut-être que la femme trouve dans cet homme une qualité cachée. D'un seul coup, je ressentis la même chose pour la physique : qu'avait perçu Feynman que je n'avais pas saisi au lycée ?

Je me mis en tête de résoudre ce mystère, et m'installai donc avec le volume 1 du *Cours de physique de Feynman* que j'avais déniché dans la bibliothèque de mon père, puis commençai ma lecture : « Si, lors d'un cataclysme, toute notre connaissance scientifique devait être anéantie et

qu'une seule phrase puisse être transmise aux générations futures, quelle affirmation contiendrait le maximum d'information dans le minimum de mots ? »

Ouah ! Ce type ne ressemblait *absolument pas* à mon professeur de physique du lycée ! Feynman poursuit : « Je pense que c'est l'hypothèse atomique [...] que toutes les choses sont faites d'atomes – des petites particules qui se déplacent en mouvement perpétuel, s'attirant mutuellement à petite distance les unes les autres et se repoussant lorsqu'on veut les faire fusionner ».

Un éclair me traversa brièvement l'esprit. Je poursuivis longtemps ma lecture, tenu en haleine. J'avais l'impression de participer à une célébration religieuse. Puis finalement je compris ! Je levais le voile sur le secret qui révélait ce qui m'avait échappé depuis si longtemps, et que Feynman avait réalisé : la physique est l'ultime aventure intellectuelle, la quête de la compréhension des mystères les plus profonds de notre Univers. La physique ne se saisit pas d'une chose fascinante pour la rendre ennuyeuse. Au lieu de cela, elle affûte notre perception, rehaussant la beauté et l'émerveillement du monde qui nous entoure. Lorsque je me rends au travail en vélo en automne, je contemple la beauté dans les arbres teintés de rouge, d'orange et d'or. Mais l'observation de ces arbres sous l'œil de la physique révèle une beauté encore plus puissante, dégagée par la citation de Feynman au début de ce chapitre. Et plus j'observe profondément, plus j'entrevois de l'élégance : nous verrons au chapitre 3 comment les arbres proviennent en fin de compte des étoiles, et au chapitre 8 comment l'étude de leurs éléments fondamentaux suggère leur existence dans des univers parallèles.

À cette époque, ma petite amie étudiait la physique à l'Institut royal de technologie, et ses manuels semblaient

beaucoup plus intéressants que les miens. Notre relation ne perdura pas, mais mon amour pour la physique, si. Puisque les études sont gratuites en Suède, je m'inscrivis dans son université sans même informer les responsables de l'École de commerce de Stockholm de ma double vie secrète. Je venais de coiffer officiellement ma casquette de détective, et cet ouvrage est le rapport de mes investigations réalisées depuis un quart de siècle.

Ainsi, qu'est-ce que la réalité ? Mon objectif, avec ce chapitre au titre si audacieux, ne consiste pas à vous livrer prétentieusement une réponse ultime (même si nous allons explorer des possibilités fascinantes dans la dernière partie), mais plutôt à vous inviter à prendre part à mon voyage d'exploration, et à partager avec vous mon exaltation et mes réflexions sur ces mystères se prolongeant jusque dans notre âme. Comme moi, je pense que vous conclurez que quelle que soit la réalité, elle est complètement différente de ce que nous imaginions, et que c'est une énigme palpitante qui réside au cœur même de nos vies quotidiennes. J'espère que vous découvrirez, comme moi, que cela redonne aux soucis de la vie courante, tels que le stationnement et les problèmes sentimentaux, une perspective rafraîchissante, de sorte qu'il soit plus facile de vivre avec et de prendre réellement plaisir à la vie et ses mystères les plus profonds.

Lorsque j'ai discuté pour la première fois de mes idées au sujet de cet ouvrage avec John Brockman, désormais mon agent littéraire, il me donna des instructions claires : « Je ne veux pas que ce soit un manuel, je veux que ce soit votre livre ». Ainsi, c'est une autobiographie scientifique dégénérée : même s'il relève plus de la physique que de ma vie, ce n'est assurément pas un ouvrage de vulgarisation scientifique tentant de survoler

de manière objective la physique afin de rendre compte du consensus en vigueur, et accordant une place égale à toutes les alternatives proposées. Au lieu de cela, il reflète ma quête personnelle sur la nature ultime de la réalité, et j'ose espérer que vous vous délecterez à la contempler avec mes yeux. Ensemble, nous allons explorer les indices que je trouve les plus fascinants, et tenter de comprendre ce que tout ceci signifie.

Nous allons commencer notre voyage en examinant comment le contexte de la question « Qu'est-ce que la réalité ? » a été entièrement remodelé par les découvertes scientifiques récentes, où la physique a éclairé sous un jour nouveau notre réalité externe, des échelles les plus vastes (chapitres 2 à 6) à celles les plus petites (chapitres 7 à 8). Dans la première partie du livre, nous considérerons la question « Quelle est la taille de l'Univers ? » et poursuivrons son ultime conclusion en voyageant à des échelles cosmiques sans cesse croissantes, explorant tant nos origines cosmiques que deux types d'univers parallèles, et découvrant que l'espace est dans un certain sens mathématique. Dans la deuxième partie, nous pourchasserons sans relâche la question « De quoi toutes les choses sont-elles constituées ? » en s'immisçant dans le microcosme subatomique, examinant une troisième espèce d'univers parallèle et découvrant que les constituants fondamentaux de la matière sont également, d'un certain point de vue, mathématiques. Dans la troisième partie, nous considérerons rétrospectivement le chemin parcouru et sa signification concernant la nature ultime de la réalité. Nous commencerons par remarquer que notre difficulté à appréhender la conscience n'entrave en rien la compréhension complète de la réalité physique externe. Nous aborderons alors mon idée la plus radicale et contestable : l'ultime réalité est

purement mathématique, dévalorisant des concepts familiers tels que le hasard et la complexité, les reléguant même au rang d'illusions, et impliquant qu'il existe un quatrième et dernier niveau d'univers parallèles. Nous achèverons notre voyage au chapitre 13, en nous demandant quelles sont les implications sur la quête de la vie dans l'Univers, pour nous, êtres humains, et pour vous, personnellement. Découvrez notre itinéraire de voyage dans la figure 1.3 ainsi que mes conseils de lecture. Un voyage fascinant nous attend : allons-y !

Lecteur assidu  
d'ouvrages de vulgarisation

<b>Comment lire ce livre :</b>	Lecteur curieux	Physicien	<b>Titre du chapitre</b>	<b>Focus</b>	<b>Statut</b>
	↓	↓			
	1	1	Qu'est-ce que la réalité ?	Introduction	
Zoom arrière (Quelle est la réalité aux échelles les plus vastes ?)	2	2	Notre place dans l'espace	Quelle est la taille de l'espace	<b>Consensuel</b>
	3	3	Notre place dans le temps	Histoire de notre Univers	
	4	4	Notre Univers en nombres	Cosmologie de précision	
	5	5	Nos origines cosmiques	Inflation cosmologique	
Zoom avant (Quelle est la réalité aux échelles les plus minuscules ?)	6	6	Bienvenue au multivers	Univers parallèles de niveaux I et II	<b>Controversé</b>
	7	7	Legos cosmiques	Mécanique quantique	<b>Consensuel</b>
Rétrospective (La réalité est-elle mathématique ?)	8	8	Le multivers de niveau III	Univers parallèle quantique	<b>Controversé</b>
	9	9	Réalité interne et externe	Le rôle de la conscience	
	10	10	Réalité physique et mathématique	Idée « la réalité est mathématique »	<b>Extrêmement controversé</b>
	11	11	Le temps est-il une illusion ?	Lui donner un sens	
	12	12	Le multivers de niveau IV	L'ultime multivers	
	13	13	La vie, notre Univers et tout le reste	L'avenir de l'Univers et de l'humanité	<b>Controversé</b>

**Figure 1.3** Comment lire ce livre. Si vous avez déjà consulté de nombreux ouvrages récents de vulgarisation scientifique et que vous pensez comprendre des notions telles que l'espace courbe, le Big Bang, le fond diffus cosmologique, l'énergie sombre, la mécanique quantique, etc., alors vous pouvez sauter les chapitres 2, 3, 4 et 7 après avoir passé en revue les encarts « En bref » situés à la fin. Si vous êtes physicien professionnel, vous pouvez également sauter le chapitre 5. Mais de nombreux concepts qui semblent familiers sont incroyablement subtils, et si vous ne pouvez répondre aux questions 1 à 16 du chapitre 2, j'espère que vous tirerez un enseignement des sections citées ci-dessus et comprendrez comment les derniers chapitres s'articulent logiquement à partir de celles-ci.

### En bref

- Je pense que l'enseignement le plus important de la physique concernant l'ultime nature de la réalité est que, quelle qu'elle soit, elle est radicalement différente de celle dictée par notre intuition.
- Dans la première partie de ce livre, nous allons faire un zoom arrière et explorer la réalité physique aux échelles les plus vastes, des planètes aux étoiles, galaxies et superamas, ainsi que l'Univers et deux niveaux possibles d'univers parallèles.
- Dans la deuxième partie, nous allons zoomer en avant et explorer la réalité physique aux échelles les plus petites, des atomes à leurs constituants les plus fondamentaux, faisant connaissance avec un troisième niveau d'univers parallèles.
- Dans la troisième partie, nous allons examiner le chemin parcouru et la nature ultime de cette étrange réalité physique, investiguant la possibilité qu'elle soit finalement purement mathématique, ou plus précisément, une structure mathématique résidant dans un quatrième et dernier niveau d'univers parallèles.
- La *réalité* possède des connotations très différentes selon les personnes. J'emploie ce terme dans son acception de nature ultime du monde physique extérieur qui nous entoure, et depuis mon enfance, j'ai puisé mon inspiration et ma fascination dans cette quête d'une meilleure compréhension.
- Ce livre relate mon voyage personnel dans l'exploration de la nature de la réalité : rejoignez-moi !



I

# ZOOM ARRIÈRE

---



## Notre place dans l'espace

---

*L'espace... est immense. Vraiment immense. Vous ne pourrez tout simplement jamais imaginer à quel point il est aussi incroyablement et prodigieusement immense.*

Douglas Adams, *Le Guide du voyageur galactique*

### Questions cosmiques

Il leva la main et je lui fis signe qu'il pouvait poser sa question. « Est-ce que l'espace se prolonge à l'infini ? » demanda-t-il.

J'étais bouche bée. Je venais de terminer une petite présentation d'astronomie au *Kids' Corner*, le centre de loisirs de mes enfants à Winchester, et ce groupe particulièrement malin de gamins était assis sur le sol, m'observant avec de grands yeux inquisiteurs, avides de réponses. Or ce garçon de cinq ans venait de me poser une question à laquelle je ne pouvais répondre ! En réalité, une question à laquelle personne sur notre planète ne peut répondre. En fait, ce n'est pas une question métaphysique stérile, mais une interrogation scientifique sérieuse pour laquelle des théories que je vais bientôt vous présenter font des prédictions précises, et dont l'une d'elles fait l'objet actuellement d'expériences riches d'enseignement. Je pense que c'est

une question réellement profonde concernant la nature fondamentale de notre réalité physique – comme nous le verrons au chapitre 5, elle nous entraînera vers deux types distincts d'univers parallèles.

Je devenais au fil du temps de plus en plus misanthrope à force de suivre les actualités mondiales, mais en quelques secondes seulement, cet enfant venait inconsciemment de me redonner une confiance inébranlable dans le potentiel de l'humanité. Si un bambin de cinq ans pouvait demander des choses aussi profondes, alors imaginez ce que nous, adultes, serions capables d'accomplir ensemble dans des circonstances idoines ! Il me rappela également toute l'importance d'une bonne éducation. Nous naissons tous curieux, mais à un certain stade, l'école parvient généralement à inhiber cette faculté. Je suis persuadé que mon principal rôle en tant qu'enseignant ne consiste pas à transmettre un savoir, mais à rallumer la flamme éteinte de cet enthousiasme à poser des questions.

J'adore les questions, surtout celles qui sont grandioses. Je considère avoir beaucoup de chance de pouvoir consacrer autant de mon temps à méditer sur ces problèmes intéressants : je peux qualifier cette activité de professionnelle, et le fait de gagner ma vie grâce à elle dépasse tout simplement mon rêve le plus insensé. Voici la liste des seize questions que l'on m'a le plus souvent posées :

- 1) *Sous quelles formes l'espace pourrait-il ne pas être infini ?*
- 2) *Comment un espace infini pourrait-il être créé en un temps fini ?*
- 3) *Dans quoi notre Univers se dilate-t-il ?*
- 4) *En quel endroit de l'espace l'explosion du Big Bang s'est-elle produite ?*

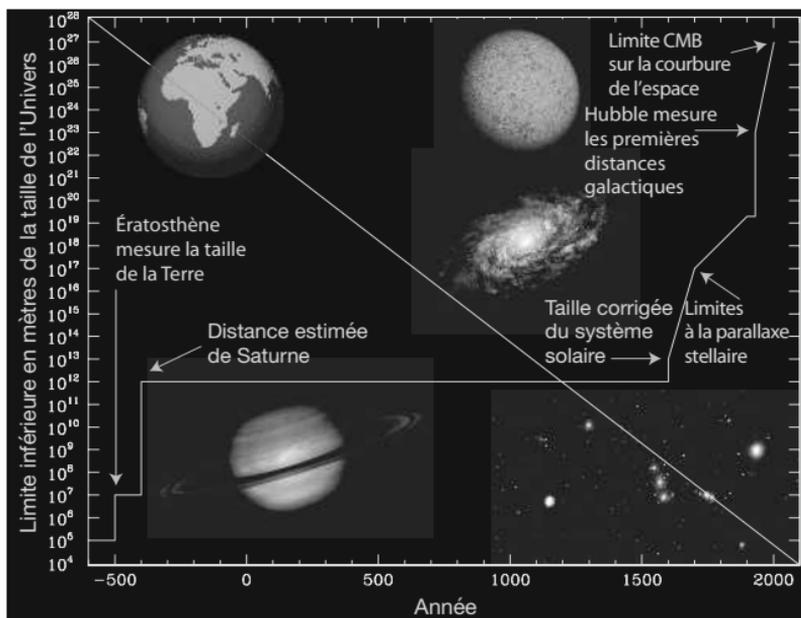
- 5) *Le Big Bang a-t-il eu lieu en un point unique ?*
- 6) *Si notre Univers n'est âgé que de 14 milliards d'années, comment pouvons-nous observer des objets distants de 30 milliards d'années-lumière ?*
- 7) *La fuite des galaxies à des vitesses supérieures à celle de la lumière ne viole-t-elle pas la théorie de la relativité ?*
- 8) *Les galaxies s'éloignent-elles réellement de nous, ou l'espace est-il simplement en expansion ?*
- 9) *La Voie lactée est-elle en expansion ?*
- 10) *Avons-nous une preuve de l'existence de la singularité du Big Bang ?*
- 11) *La création de matière, par l'inflation, autour de nous à partir de presque rien ne viole-t-elle pas la conservation de l'énergie ?*
- 12) *Qu'est-ce qui a donné naissance à notre Big Bang ?*
- 13) *Que s'est-il passé avant le Big Bang ?*
- 14) *Quel est le destin ultime de notre Univers ?*
- 15) *Que sont la matière noire et l'énergie sombre ?*
- 16) *Sommes-nous insignifiants ?*

Focalisons-nous sur ces questions. Nous répondrons à onze d'entre elles dans les quatre prochains chapitres, et découvrirons des embûches subtiles et intéressantes pour les cinq autres. Mais tout d'abord, revenons à la question de cet enfant, qui formera le fil d'Ariane de toute la première partie de cet ouvrage : *l'espace se prolonge-t-il à l'infini ?*

Quelle est la taille de l'espace ?

Mon père m'avait autrefois énoncé le conseil suivant : « Si tu as un jour une question épineuse à laquelle tu ne peux trouver réponse, considère d'abord une question plus simple à laquelle tu peux répondre ». Dans cet esprit,

commençons par nous demander quelle taille minimale l'espace doit-il avoir pour ne pas contredire nos observations. La figure 2.1 montre que la réponse à cette question s'est considérablement agrandie au cours des siècles : nous savons désormais que notre espace est au moins mille milliards de milliards ( $10^{21}$ ) de fois plus grand que les plus grandes distances connues de nos ancêtres chasseurs-cueilleurs – lesquelles représentaient environ la distance parcourue à pied au cours d'une vie. De surcroît, la figure révèle que cette expansion de nos horizons ne s'est pas opérée une seule fois, mais à de multiples reprises. Chaque fois que nous, êtres humains, sommes parvenus à cartographier l'Univers et à décupler sans cesse sa taille,



**Figure 2.1** Notre limite inférieure concernant la taille de l'Univers s'est sans cesse accrue, comme nous le décrivons dans ce chapitre. Notez que l'échelle verticale est extrême: elle s'accroît d'un facteur 10 à chaque graduation.

nous avons découvert que tout ce que nous savions auparavant fait partie d'un ensemble beaucoup plus vaste. Comme l'illustre la figure 2.2, notre pays est situé sur une planète, qui fait partie d'un système solaire, qui appartient à une galaxie, qui participe à la figure cosmique dessinée par un amas de galaxies, lequel fait partie de notre univers observable, qui, comme nous le verrons, contribue à un ou plusieurs niveaux d'univers parallèles.

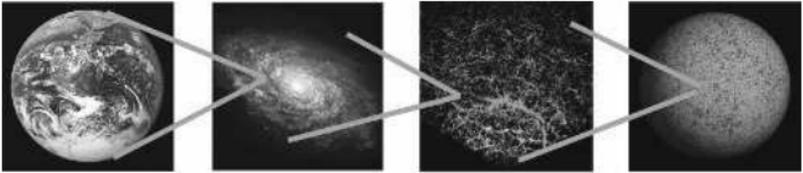


Figure 2.2 Chaque fois que nous sommes parvenus à prendre de la distance, nous avons découvert que tout ce que nous savions n'était qu'une partie d'un ensemble plus vaste: notre pays est situé sur une planète (à gauche), qui appartient à un système solaire, qui compose une galaxie (milieu gauche), qui dessine le motif cosmique d'un amas de galaxies (milieu droite), qui fait partie de notre Univers observable (à droite), qui pourrait contribuer à un ou plusieurs niveaux d'univers parallèles.

À l'instar d'une autruche ayant enfoui sa tête dans le sable, nous avons perpétuellement supposé que tout ce que nous pouvions observer représentait tout ce qui existait, et notre orgueil nombriliste nous poussait à nous imaginer au centre du monde. Dans notre quête de la compréhension du cosmos, le fil conducteur a donc été la sous-estimation. Néanmoins, les éléments illustrés dans la figure 2.1 soulèvent également une deuxième idée que je trouve pleine d'inspiration : *nous avons sans cesse sous-estimé non seulement la taille de notre cosmos, mais également la puissance de notre intelligence humaine pour l'appréhender*. Nos ancêtres vivant dans les cavernes avaient des cerveaux aussi volumineux

que les nôtres, mais puisqu'ils ne passaient pas leurs soirées à regarder la télé, je suis certain qu'ils se posaient des questions du style « Qu'est-ce que tout ce fatras là-haut dans le ciel ? » et « D'où tout cela provient-il ? » Ils se transmettaient des histoires et des mythes fantastiques, mais réalisaient à peine qu'ils avaient la capacité d'appréhender par eux-mêmes les réponses à ces questions. De fait, le secret ne réside pas dans l'art d'apprendre à voler dans l'espace pour examiner les objets célestes, mais à laisser voltiger son imagination.

Il n'y a pas de meilleure chance d'échouer que de se convaincre que la réussite est impossible, et par conséquent de ne jamais tenter. Rétrospectivement, la plupart des grands bonds en avant en physique auraient pu survenir plus tôt parce que les prérequis nécessaires étaient déjà en place. L'équivalent en hockey sur glace serait de rater un but dégagé parce vous pensez à tort que votre crosse est brisée. Dans les chapitres qui suivent, je vous ferai part d'exemples remarquables où de tels échecs patents furent finalement surpassés par Isaac Newton, Alexander Friedmann, George Gamow et Hugh Everett. En ce sens, cette citation du prix Nobel de physique Steven Weinberg résonne en moi : « Il en est très souvent ainsi en physique : notre erreur n'est pas due au fait que nous prenons nos théories trop au sérieux, mais que nous ne les prenons pas assez au sérieux ».

Explorons d'abord comment nous pouvons évaluer la taille de la Terre et les distances de la Lune, du Soleil, des étoiles et des galaxies. Je trouve personnellement que c'est l'une des énigmes policières les plus passionnantes qui soient, et indubitablement à l'origine de la science moderne : je suis donc impatient de vous la faire partager en préambule à notre principale discussion – les dernières avancées en cosmologie. Comme vous le verrez, les quatre

premiers exemples n'invoquent rien de plus sorcier que quelques mesures d'angles. Ils illustrent également l'importance de se laisser entraîner par les mystères d'observations apparemment banales, du fait qu'elles pourraient dévoiler des indices déterminants.

## La taille de la Terre

Dès que le commerce maritime a commencé à prospérer, les gens ont remarqué que lorsque des navires s'éloignaient à l'horizon, leurs coques disparaissaient avant leurs voiles. Cela leur suggéra l'idée que la surface de l'océan est arrondie et que la Terre est sphérique, de même que semblaient l'être le Soleil et la Lune. Les Grecs de l'Antiquité découvrirent également des pièces à conviction en remarquant que la Terre forme une ombre ronde sur la Lune au cours d'une éclipse, comme vous pouvez l'observer sur la figure 2.3. Même s'il est facile d'estimer la taille de la Terre grâce à la navigation maritime<sup>1</sup>, Ératosthène obtint une valeur beaucoup plus précise, il y a plus de 2 200 ans, grâce à un usage astucieux de mesures angulaires. Il savait que le Soleil était au zénith dans la ville égyptienne de Syène, à midi lors du solstice d'été, mais qu'il était à 7,2 degrés au sud de la verticale à Alexandrie au même moment, 794 kilomètres plus au nord. Il en conclut par conséquent que parcourir 794 kilomètres équivalait à se déplacer de 7,2 degrés sur les 360 degrés que compte la circonférence de la Terre, de sorte que cette circonférence doit être égale à environ  $794 \text{ km} \times 360^\circ / 7,2^\circ \approx 39\,700 \text{ km}$ , valeur remarquablement proche de celle moderne de 40 000 km.

---

1. Le rayon de la Terre s'élève approximativement à  $d^2/2h$ , où  $d$  est la plus grande distance vous permettant d'observer un navire de hauteur  $h$  depuis le niveau de la mer.



**Figure 2.3** Au cours d'une éclipse, la Lune traverse l'ombre formée par la Terre (voir ci-dessus). Il y a plus de deux mille ans, Aristarque de Samos compara la taille de la Lune à celle de l'ombre de la Terre produite au cours d'une éclipse lunaire pour en déduire à juste raison que notre satellite est environ quatre fois plus petit que notre planète. (Montage photographique de Scott Ewart.)

Ironie de l'histoire, Christophe Colomb galvauda complètement ce résultat en se fondant sur des calculs ultérieurs beaucoup moins précis et en confondant les unités de distances arabe et italienne, concluant qu'il lui suffisait de naviguer sur 3 700 km pour atteindre l'Orient, lorsque la véritable valeur est de 19 600 km. Indubitablement, il n'aurait jamais pu financer son expédition si ses maths avaient été correctes, et il n'aurait jamais pu survivre si l'Amérique n'existait pas, de sorte qu'il est parfois plus important d'avoir de la chance que d'avoir raison.

## Distance de la Lune

Depuis la nuit des temps, les éclipses ont inspiré la peur, les sacrifices et les mythes. En réalité, alors qu'il avait échoué en Jamaïque, Christophe Colomb parvint à intimider les indigènes en prédisant l'éclipse de lune du 29 février 1504.

Les éclipses de lune nous révèlent également un indice magnifique sur la taille du cosmos. Il y a plus de deux mille ans, Aristarque de Samos remarqua ce que vous pouvez observer vous-mêmes sur la figure 2.3 : lorsque la Terre se trouve entre le Soleil et la Lune et donne lieu à une éclipse de lune, l'ombre qu'elle forme sur notre satellite possède un bord arrondi – et l'ombre ronde de la Terre est plus grande que la Lune. Aristarque réalisa également que cette ombre est légèrement plus petite que la Terre elle-même, du fait que celle-ci est plus petite que le Soleil, et parvint à s'accommoder de manière correcte de cette complication pour conclure que la Lune est environ 3,7 fois plus petite que la Terre. Comme Ératosthène avait déjà calculé la taille de la Terre, Aristarque la divisa tout simplement par 3,7 et obtint celle de la Lune ! À mon sens, c'est à partir de ce moment que notre imagination humaine a délibérément quitté la terre ferme pour commencer à conquérir l'espace. De nombreuses personnes avant Aristarque avaient observé la Lune et s'interrogeaient sur sa taille, mais il fut le premier à la calculer, simplement grâce à la puissance du raisonnement et non celle d'une fusée.

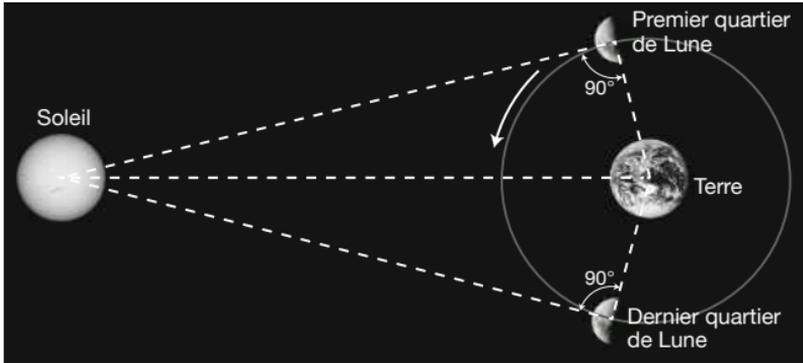
Une découverte scientifique en entraîne souvent une autre, et dans cette situation, la taille de la Lune a immédiatement révélé sa distance. Écartez vos doigts au bout de votre bras tendu et recherchez quels objets de votre entourage vous pouvez occulter de votre vue avec votre auriculaire. Celui-ci recouvre un angle d'environ un degré, ce qui est à peu près le double de ce dont vous avez besoin pour recouvrir la Lune – ne manquez pas de vérifier cela la prochaine fois que vous observerez notre astre nocturne ! Pour qu'un objet puisse recouvrir un demi-degré, sa distance doit s'élever à environ 115 fois sa taille, donc si vous jetez un œil par-dessus le hublot de votre avion

et parvenez à couvrir une piscine olympique de 50 mètres avec la moitié de votre petit doigt, vous saurez que votre altitude s'élève à  $115 \times 50 \text{ m} \approx 6 \text{ km}$ . De la même manière, Aristarque calcula que la distance de la Lune équivalait à 115 fois sa taille, laquelle s'avère être égale à 30 fois environ le diamètre de la Terre.

## Distance du Soleil et des planètes

Or, qu'en est-il du Soleil ? Tentez de l'occulter à l'aide de votre auriculaire et vous verrez qu'il recouvre à peu près le même angle que la Lune, soit un demi-degré. Il est incontestablement plus éloigné que notre satellite, car celui-ci le masque (tout juste) au cours d'une éclipse totale de soleil, mais dans quelle proportion ? Cela dépend de sa taille : par exemple, s'il était trois fois plus grand que la Lune, il devrait être trois fois plus éloigné pour recouvrir le même angle.

Aristarque de Samos était en avance sur son temps, et répondit également de façon astucieuse à cette question. Il comprit que le Soleil, la Lune et la Terre forment les trois sommets d'un triangle rectangle au cours du « premier quartier de Lune », lorsque nous observons exactement la moitié de la surface lunaire faisant face à la Terre, illuminée par la lumière du Soleil (voir la figure 2.4). Il estima que l'angle entre la Lune et le Soleil devait faire 87 degrés environ à ce moment-là. Il connaissait donc tant la forme du triangle que la longueur du côté Terre-Lune, et tira parti de la trigonométrie pour évaluer la longueur du côté Terre-Soleil, c'est-à-dire la distance entre la Terre et le Soleil. Il en conclut que le Soleil était environ 20 fois plus éloigné que la Lune et par conséquent 20 fois plus gros que celle-ci. En d'autres termes, le Soleil est énorme : son diamètre devait être plus de cinq fois plus grand que celui



**Figure 2.4** En mesurant l'angle entre le quartier de lune et le Soleil, Aristarque fut capable d'estimer notre distance à l'astre du jour. (Ce croquis n'est pas à l'échelle : le Soleil est plus de cent fois plus gros que la Terre et environ 400 fois plus éloigné que la Lune.)

de la Terre. Cette révélation poussa Aristarque à proposer l'hypothèse héliocentrique longtemps avant Nicolas Copernic : il présentait qu'il était plus raisonnable que la Terre gravite autour d'un Soleil beaucoup plus gros que l'inverse.

Cette histoire suscite à la fois de l'inspiration et de la circonspection, nous enseignant qu'intelligence et quantification des incertitudes de nos mesures sont tout aussi importantes. Les Grecs de l'Antiquité étaient moins versés dans cette dernière aptitude, et Aristarque ne dérogeait malheureusement pas à la règle. Il s'avérait assez difficile de dire précisément à quel moment la Lune était illuminée à 50 %, et l'angle Lune-Soleil correct à cet instant ne s'élevait pas à 87 degrés mais à environ 89,85 degrés, soit extrêmement proche de l'angle droit. Cela conduit à un triangle (figure 2.4) extrêmement long et effilé : en réalité, le Soleil est quasiment 20 fois plus éloigné que ce qu'avait estimé Aristarque, et à peu près 109 fois plus grand que le diamètre de la Terre – vous pouvez donc entasser plus

d'un million de Terres dans le volume du Soleil. Quoi qu'il en soit, cette erreur flagrante se perpétua durant presque deux mille ans, de sorte que lorsque Copernic calcula la taille et la forme de notre système solaire grâce à des considérations géométriques plus élaborées, il obtint les bonnes formes et tailles relatives pour toutes les orbites planétaires, mais l'échelle globale de son modèle de système solaire était environ 20 fois trop petite – cela revenait à confondre une véritable maison avec une maison de poupée.

## Distance des étoiles

Et qu'en est-il des étoiles ? À quelle distance se trouvent-elles ? Que sont-elles ? Je pense personnellement que c'est l'une des plus grandes énigmes policières parmi les « affaires non classées ». La découverte des distances de la Lune et du Soleil est impressionnante, mais nous avons au moins quelques indices à exploiter : ils changent de position dans le ciel de manière remarquable, et possèdent des formes et des tailles angulaires que nous pouvons mesurer. Or une étoile semble totalement inaccessible ! Elle ressemble à une minuscule tache blanchâtre. Si vous l'observez plus attentivement vous ne verrez... qu'une minuscule tache blanchâtre n'exhibant ni forme ni taille discernable, à l'instar d'un point de lumière. De surcroît, les étoiles semblent immobiles sur la voûte céleste, exceptée la rotation générale apparente de l'ensemble des figures stellaires due, comme nous le savons, à une simple illusion engendrée par la rotation de la Terre.

Certains savants conjecturèrent que les étoiles étaient de petits trous dans une sphère opaque, laissant passer la lumière d'une source resplendissante située au-delà. L'astronome italien Giordano Bruno suggéra au contraire que c'était des objets tels que notre Soleil, tout simplement

beaucoup plus éloignés, hébergeant peut-être leurs propres planètes et civilisations – cela ne convenait nullement aux opinions de l'Église catholique, ce qui le conduisit au bûcher en 1600.

En 1608, une lueur soudaine d'espoir jaillit : l'invention du télescope ! Galilée perfectionna rapidement le dispositif, observa les astres à travers ses télescopes qu'il améliorait sans cesse, et vit... à nouveau de minuscules taches blanchâtres. Retour à la case départ. Je me souviens de la douce époque où, enfant, je jouais « Brille, brille, petite étoile » sur piano de ma grand-mère. En 1806, où cette berceuse<sup>2</sup> fut diffusée pour la première fois, le refrain « Je me demande ce que tu es » vibrait *toujours* dans l'esprit des gens, et personne ne pouvait honnêtement proclamer connaître la véritable réponse.

Si les étoiles sont vraiment de lointains soleils comme le suggéra Bruno, alors elles doivent être considérablement plus éloignées que notre Soleil pour paraître si pâles. Mais de combien ? Cela dépend de leur luminosité intrinsèque, que nous aimerions également connaître. 32 ans après que la chanson fut diffusée, le mathématicien et astronome allemand Friedrich Bessel parvint finalement à réaliser une percée dans cette affaire policière. Tenez votre pouce à bout de bras puis fermez alternativement votre œil gauche et droit plusieurs fois. Voyez-vous que votre pouce semble bondir de gauche à droite, et *vice versa*, d'un certain angle par rapport aux objets en arrière-plan ? Rapprochez maintenant votre pouce de vos yeux et vous verrez que cet intervalle angulaire s'accroît. Les astronomes ont baptisé

---

2. Les paroles originales de cette berceuse anglaise sont  
*Twinkle, twinkle, little star*  
*How I wonder what you are*

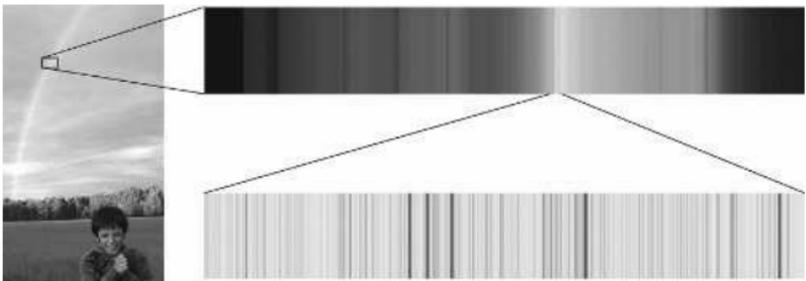
cet angle de saut la *parallaxe*, et vous pouvez en faire un usage judicieux pour calculer la distance de votre pouce. En réalité, vous n'avez pas besoin de vous soucier de faire des maths car votre cerveau le fait pour vous de façon si inconsciente que vous ne vous en apercevez même pas – le fait que vos deux yeux mesurent les objets à des angles différents en fonction de leur distance est le fondement même de la manière dont le système de perception de profondeur de votre cerveau agit pour vous procurer une vision tridimensionnelle.

Si vos yeux étaient plus écartés, vous auriez une meilleure perception de la profondeur aux grandes distances. En astronomie, nous pouvons judicieusement tirer parti de la parallaxe et prétendre être des géants aux yeux distants de 300 milliards de mètres, ce qui représente le diamètre de l'orbite terrestre autour du Soleil. Cela est possible parce que nous pouvons comparer les photographies de télescopes prises à six mois d'intervalle, lorsque la Terre se trouve en deux points opposés de part et d'autre du Soleil. Ce faisant, Bessel remarqua que, alors que la majorité des étoiles apparaissaient à des positions exactement identiques sur ses deux photographies, une étoile particulière faisait exception : celle au nom sibyllin de 61 Cygni. Au lieu de cela, celle-ci s'était déplacée d'un petit angle, révélant que sa distance s'élevait à environ un million de fois celle du Soleil – une distance si colossale qu'il faut onze années à sa lumière pour nous parvenir, alors que celle du soleil ne met que huit minutes !

Assez rapidement, on mesura la parallaxe de nombreuses autres étoiles, si bien que ces mystérieuses taches blanchâtres se virent affublées d'une distance ! Si vous observez une automobile s'éloigner la nuit, la luminosité de ses feux arrière chute comme l'inverse du carré de sa

distance (deux fois plus loin implique quatre fois plus pâle). Du coup, comme Bessel connaissait la distance de 61 Cygni, il utilisa la loi du carré inverse pour calculer sa luminosité. Sa réponse lui révélait une luminosité du même ordre de grandeur que celle du Soleil, suggérant que, tout compte fait, Giordano Bruno avait bel et bien raison !

À peu près au même moment, un deuxième progrès notable eut lieu mais empruntant une approche radicalement différente. En 1814, l'opticien allemand Joseph von Fraunhofer inventa un dispositif baptisé *spectrographe*, qui lui permettait de séparer la lumière blanche en un arc-en-ciel des couleurs qui la composent et de les mesurer avec une excellente précision. Il découvrit de mystérieuses raies sombres dans l'arc-en-ciel (voir la figure 2.5) et que la position détaillée de ces raies au sein du spectre coloré dépendait de la constitution de la source lumineuse, incarnant ainsi une espèce d'empreinte digitale spectrale. Dans les décennies qui suivirent, ces spectres furent mesurés et



**Figure 2.5** L'arc-en-ciel encadrant mon fils Alexander ne mène pas à un chaudron rempli d'or, mais à une mine d'or d'informations sur le fonctionnement des atomes et des étoiles. Comme nous l'explorerons au chapitre 7, les intensités relatives des diverses couleurs s'expliquent par le fait que la lumière est constituée de corpuscules (les photons), et les positions et largeurs des nombreuses raies sombres peuvent être calculées grâce à l'équation de Schrödinger de la mécanique quantique.

catalogués pour de nombreuses substances communes. Vous pouvez utiliser cette information pour mettre en scène un tour de magie et impressionner vos amis en leur prédisant ce qui brille dans leur lanterne, sans même l'approcher, simplement en analysant la lumière émise. De façon sensationnelle, le spectre de la lumière du jour révèle que le Soleil, ce mystérieux globe flamboyant dans le ciel, contient des éléments bien connus sur la Terre, tels que l'hydrogène. Qui plus est, lorsque la lumière stellaire provenant d'un télescope est observée dans un spectroscopie, elle révèle que les étoiles sont constituées approximativement de la même mixture de gaz que le Soleil ! Cela corrobore Bruno : les étoiles sont des soleils éloignés, similaires au nôtre tant dans l'énergie émise que dans le contenu. Ainsi, en quelques décennies seulement, les étoiles étaient passées du rang de taches blanchâtres insondables à celui de boules géantes de gaz brûlant dont nous pouvions analyser la composition chimique.

Le spectre est une mine d'or d'informations astronomiques et chaque fois que vous pensez en avoir tiré tout ce que vous pouviez, vous découvrez qu'il renferme d'autres indices encore. En premier lieu, le spectre permet de mesurer la température d'un objet sans même le mettre en contact avec un thermomètre. Vous savez que, sans la toucher, une pièce métallique est plus chaude lorsqu'elle émet une lueur blanche qu'une rouge, et de façon analogue une étoile blanchâtre est plus chaude qu'une étoile rougeâtre. Grâce au spectrographe, vous pouvez déterminer assez fidèlement la température. Or – surprise ! – cette information permet de déterminer la taille de l'astre, de même que la découverte d'un mot dans des mots croisés peut en dévoiler un autre. La subtilité, c'est que la température nous indique quelle quantité de lumière émerge de chaque

mètre carré de la surface stellaire. Puisque nous pouvons évaluer la quantité totale de lumière rayonnée par l'astre (à partir de sa distance et de sa luminosité apparente), nous pouvons désormais savoir combien de mètres carrés la surface de l'étoile doit recouvrir, et par conséquent quelle est sa taille.

Comme si cela ne suffisait pas, le spectre d'une étoile recèle également des indices cachés sur son mouvement, lequel décale très légèrement la fréquence (la couleur) de la lumière par le truchement de ce que l'on appelle le décalage Doppler, un effet qui explique également que le *vr000000000m* d'une voiture filant à toute vitesse passe de l'aigu au grave : la fréquence augmente lorsque le véhicule se rapproche puis diminue lorsqu'il s'éloigne. Contrairement à notre Soleil, la plupart des étoiles entretiennent une relation binaire stable avec une étoile appariée, et les deux partenaires dansent l'une autour de l'autre sur une orbite régulière. Nous pouvons souvent déceler ce ballet grâce à l'effet Doppler, qui décale d'avant en arrière les raies spectrales des étoiles, à raison d'une fois par révolution. La grandeur du décalage révèle la vitesse du mouvement, et en examinant les deux astres, nous pouvons parfois mesurer leur éloignement mutuel. En manipulant cette information, nous pouvons tirer une autre conclusion primordiale : nous pouvons peser les étoiles sans même les poser sur un gigantesque pèse-personne, en mettant à profit les lois de Newton sur le mouvement et la gravitation pour calculer la masse qu'elles doivent avoir afin d'effectuer les orbites observées. Dans certaines situations, ces décalages Doppler ont également permis d'attester que des planètes gravitent autour de certaines étoiles. Si la planète passe devant l'étoile, la légère diminution de la luminosité stellaire est un indicateur de la taille de la

planète, et la légère variation dans les raies spectrales peut révéler si la planète en question possède une atmosphère et quelle est sa composition. Le spectre est un trésor d'une richesse intarissable. Par exemple, la mesure de la largeur des raies spectrales d'une étoile de température donnée permet de déterminer sa pression gazeuse. De même, si nous mesurons la distance au sein de laquelle les raies spectrales se divisent en deux ou plusieurs raies se jouxtant, nous pouvons quantifier l'intensité du magnétisme présent à la surface de l'astre.

Pour conclure, la seule information dont nous disposons sur les étoiles est leur pâle lueur qui nous parvient, mais grâce à un astucieux travail de détective, nous sommes capables de décoder cet indice en renseignements sur leur distance, leur taille, leur masse, leur composition, leur température, leur pression, leur magnétisme et sur le fait qu'elles hébergent ou non un système planétaire. C'est une prouesse enivrante que notre intelligence humaine ait pu déduire tout cela de ces taches blanchâtres apparemment insondables, prouesse digne de Sherlock Holmes et Hercule Poirot !

## Distance des galaxies

Lorsque ma grand-mère nous a quittés à 102 ans, j'ai passé un certain temps à méditer sur sa vie, et ce qui me frappa, c'est qu'elle ait grandi dans un univers différent. Lorsqu'elle est allée à l'école, notre Univers connu se limitait à notre système solaire et une nuée d'étoiles l'enveloppant. Elle a dû probablement imaginer avec ses amies que ces astres étaient extraordinairement lointains : leur lumière devait mettre plusieurs années à nous parvenir pour les plus proches, et des milliers d'années pour les plus éloignés encore visibles. Ce sont dorénavant des objets familiers de notre paysage cosmique.

S'il y avait eu des astronomes dans son école, ils auraient débattu sur ce que l'on nomme des nébuleuses, des objets ressemblant à des nuages diffus dans le ciel nocturne, certaines exhibant de magnifiques spirales comme celles de la célèbre toile de van Gogh *La Nuit étoilée*. Mais que sont-elles ? De nombreux astronomes les négligeaient, les considérant comme des nuages de gaz inintéressants situés entre les étoiles, mais d'autres soutenaient un point de vue plus radical : ce sont des « univers-îles », que nous appelons aujourd'hui *galaxies* : des regroupements énormes d'étoiles si éloignées que nous ne pouvons les observer individuellement à l'aide de nos télescopes, et apparaissant plutôt sous la forme d'une tache nébuleuse. Pour lever cette controverse, les astronomes devaient mesurer l'éloignement de certaines nébuleuses. Mais comment ?

La technique de la parallaxe, qui avait si bien fonctionné pour les étoiles proches, ne convenait plus aux nébuleuses : elles sont si éloignées que leurs angles de parallaxe sont trop infimes pour être décelés. Comment pouvons-nous alors mesurer de si grandes distances ? Si vous observez au télescope une ampoule électrique lointaine et remarquez qu'il est inscrit « 100 watts » sur celle-ci, vous êtes fixé : vous utilisez tout simplement la loi du carré inverse pour calculer la distance à laquelle elle se situe de la Terre pour paraître aussi brillante. Les astronomes ont baptisé ces objets utiles, de luminosité connue, des *chandelles standard*. Or, en tirant parti des méthodes de détective déjà décrites, les astronomes avaient malheureusement découvert que les étoiles n'ont rien de standard : certaines brillent un million de fois plus que le Soleil et d'autres sont un millier de fois plus pâles. Cependant, si vous pouviez observer une étoile et affirmer qu'il est inscrit «  $4 \times 10^{26}$  watts » sur celle-ci (ce qui serait l'inscription correcte pour notre Soleil), vous

auriez votre chandelle standard et pourriez évaluer sa distance comme pour l'ampoule. Par chance, la nature nous a légué un type particulier d'étoiles, nommé étoiles variables céphéides. Leur luminosité varie dans le temps à mesure que leur taille oscille. L'astronome de Harvard Henrietta Swan Leavitt découvrit en 1912 que la fréquence de leurs pulsations agit comme un métronome : plus il s'écoule de jours entre deux pulsations successives, plus il y a de watts de lumière rayonnée.

Ces étoiles céphéides revêtent également l'avantage d'être suffisamment brillantes pour être vues sur de vastes distances (certaines peuvent briller 100 000 fois plus que notre Soleil), et l'astronome américain Edwin Hubble en découvrit plusieurs dans la nébuleuse d'Andromède – un nuage de la taille de la Lune que vous pouvez contempler à l'œil nu si vous êtes loin de toute lumière urbaine. Utilisant le télescope Hooker récemment mis en place en Californie (son miroir de 2,5 mètres était à l'époque le plus grand au monde), il mesura leur fréquence de pulsation, appliqua la formule de Leavitt pour calculer leur luminosité, et la compara à leur luminosité apparente pour en déduire leur éloignement. Lorsqu'il annonça ses résultats lors d'une conférence en 1925, ce fut la consternation : il proposait qu'Andromède soit une galaxie distante d'environ un million d'années-lumière, un millier de fois plus que la plupart des étoiles vues par ma grand-mère dans son ciel nocturne ! Nous savons désormais que la galaxie d'Andromède est encore plus lointaine que l'avait estimé Hubble, elle se trouve à trois millions d'années-lumière de nous, de sorte que Hubble avait par inadvertance perpétué la tradition de la sous-estimation fortuite remontant à Aristarque et Copernic.

Dans les années qui suivirent, Hubble et d'autres astronomes découvrirent des galaxies encore plus lointaines, extrapolant nos horizons à des milliards d'années-lumière de nous ; le chapitre 5 nous propulsera dans les milliers de milliards d'années-lumière, voire plus.

## Qu'est-ce que l'espace ?

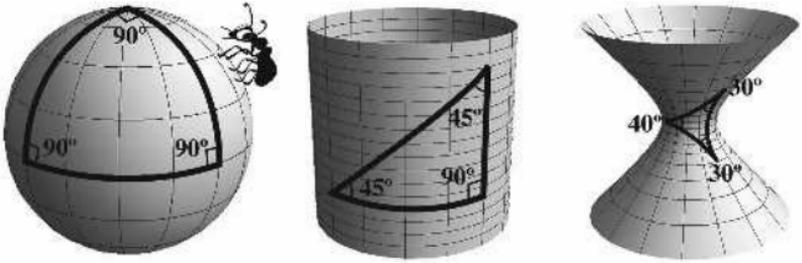
Ainsi, comme l'a demandé notre élève de maternelle : l'espace se prolonge-t-il à l'infini ? Nous pouvons aborder cette question de deux manières : phénoménologiquement et théoriquement. Jusqu'à présent dans ce chapitre, nous avons suivi la première, explorant comment des mesures judicieuses ont progressivement révélé des régions toujours plus distantes de l'espace, sans limite en perspective. Néanmoins, de nombreux progrès ont été effectués également sur le plan théorique. En premier lieu, sous quelles formes l'espace pourrait-il *ne pas* être infini ? Comme je l'ai exposé à ces enfants, il serait assez bizarre que l'on rencontre un panneau tel que celui indiqué dans la figure 2.6, nous mettant en garde sur le fait que nous sommes



**Figure 2.6** Il est difficile d'imaginer comment l'espace pourrait être fini. S'il avait une fin, qu'y aurait-il au-delà ?

parvenus au bout de l'espace. Je me souviens y avoir réfléchi lorsque j'étais enfant : qu'y aurait-il au-delà de ce panneau ? Pour moi, la crainte d'atteindre la limite de l'espace semblait aussi idiote que l'appréhension des anciens marins qui redoutaient de sombrer au bout de la Terre. J'en conclus par conséquent, de façon purement logique, que l'espace doit tout simplement se prolonger à jamais et être infini. En vérité, selon un raisonnement logique qui remonte à l'Antiquité grecque, Euclide avait réalisé que la géométrie est réellement mathématique, et que l'espace infini en 3D peut être décrit avec la même rigueur que les autres structures mathématiques, telles que les ensembles de nombres. Il développa sa magnifique théorie mathématique de l'espace tridimensionnel infini et ses propriétés géométriques, et tout le monde s'accorda à la considérer comme la seule représentation logiquement possible de notre espace physique.

Malgré tout, dans les années 1800, les mathématiciens Carl Friedrich Gauss, János Bolyai et Nikolai Lobatchevski découvrirent qu'il existait d'autres possibilités logiques que l'espace tridimensionnel uniforme, et Bolyai, exalté, écrivit à son père : « J'ai créé à partir de rien un nouvel univers étrange ». Ces nouveaux espaces obéissent à des règles différentes : par exemple, ils ne sont plus nécessairement infinis comme l'espace envisagé par Euclide, et la somme des angles d'un triangle n'est plus forcément égale à 180 degrés comme le stipulait la formule d'Euclide. Imaginez que vous dessiniez un triangle sur les surfaces bidimensionnelles de chacune des formes 3D de la figure 2.7 : ses trois angles s'additionneront pour former un angle supérieur, égal ou inférieur à  $180^\circ$  dans le cas, respectivement, de la sphère (à gauche), du cylindre (au milieu) ou de l'hyperboloïde (à droite). De surcroît, la



**Figure 2.7** Si vous dessinez des triangles sur ces surfaces, la somme de leurs angles donne respectivement plus de  $180^\circ$  (à gauche), exactement  $180^\circ$  (au milieu) et moins de  $180^\circ$  (à droite). Einstein nous a appris que ces trois alternatives sont également possibles pour des triangles de notre espace tridimensionnel.

surface bidimensionnelle de la sphère est finie même si elle ne possède aucun bord.

Cet exemple montre qu'une surface peut violer les règles de la géométrie d'Euclide si elle n'est pas plate. Néanmoins, Gauss et d'autres géomètres soutenaient une perspective plus radicale : un espace peut être intrinsèquement courbe, même si ce n'est la surface de rien du tout ! Supposez que vous soyez une fourmi aveugle et désirez deviner sur laquelle des trois surfaces de la figure 2.7 vous marchez. Vous avez l'impression de vivre effectivement dans un espace bidimensionnel, parce que vous n'avez pas accès à la troisième dimension (s'éloigner de la surface), mais cela n'entrave en rien votre travail de détective : vous pouvez toujours définir une droite (comme étant la trajectoire la plus courte entre deux points), et il vous suffit donc d'additionner les trois angles d'un triangle. Par exemple, si vous obtenez  $270^\circ$ , vous proclamez « Ah, ah ! Cela fait plus de  $180^\circ$  donc je suis sur une sphère ! » Pour impressionner davantage vos amies fourmis, vous pouvez même calculer la distance que vous devrez parcourir en ligne droite avant de revenir au point de départ. Autrement dit,

tous les outils géométriques classiques que sont les points, les droites, les angles, la courbure et ainsi de suite peuvent être définis de manière rigoureuse en faisant uniquement appel à ce qui existe dans votre espace bidimensionnel, sans jamais se référer à une troisième dimension. Cela signifie que les mathématiciens peuvent définir rigoureusement une surface bidimensionnelle courbe même s'il n'existe pas de troisième dimension : elle est autosuffisante, elle n'a pas besoin d'être la surface d'autre chose.

Pour la plupart des gens, cette découverte mathématique des espaces non euclidiens donnera un peu l'impression d'être une abstraction mathématique ésotérique, sans utilité pratique dans notre monde physique. Mais lorsqu'Einstein leva le voile sur sa théorie de la relativité générale, celle-ci disait en substance : « Nous sommes des fourmis ! » La théorie d'Einstein permet à notre espace tridimensionnel d'être courbe – même s'il est dépourvu de quatrième dimension cachée dans laquelle il se serait incurvé. Donc la question de savoir dans quel type d'espace nous vivons *ne peut pas* être résolue uniquement par la logique pure, comme l'auraient espéré certains admirateurs d'Euclide. Elle ne peut être levée que par l'élaboration de mesures – telle que la formation d'un gigantesque triangle dans l'espace (dont les côtés seraient des rayons lumineux, par exemple) et la vérification si la somme des angles est égale à  $180^\circ$ . Dans le chapitre 4, je vous indiquerai comment mes collègues et moi-même sommes amusés à faire précisément cela : la réponse s'avère être d'environ  $180^\circ$  pour des triangles de la taille de l'Univers, mais largement plus de  $180^\circ$  si une étoile à neutrons ou un trou noir occupe une portion significative du triangle, donc la forme de notre espace physique est plus compliquée que les trois options élémentaires indiquées dans la figure 2.7.

Si nous revenons à la question de notre élève de maternelle, nous voyons que la théorie d'Einstein permet à l'espace d'être fini, sous une forme qui n'est pas celle ridicule de la figure 2.6 : il peut être fini du fait de sa courbure. Par exemple, si notre espace tridimensionnel est courbé comme la surface d'une hypersphère à quatre dimensions, alors nous pouvons voyager en ligne droite suffisamment loin de façon à rejoindre finalement le point de départ dans la direction opposée. Nous ne sombrerions pas au bord de notre espace 3D parce qu'il n'en aurait pas, de même que notre fourmi de la figure 2.7 ne rencontre aucun bord lorsqu'elle déambule tout autour de la sphère.

En vérité, Einstein permet à notre espace tridimensionnel d'être fini même s'il n'est pas courbé ! Le cylindre de la figure 2.7 est plat, et non courbe, au sens mathématique du terme : si vous dessinez un triangle sur une feuille cylindrique, la somme de ses angles est égale à  $180^\circ$ . Pour s'en convaincre, découpez simplement le triangle à l'aide d'une paire de ciseaux, et remarquez que vous pouvez l'aplatir sur une table ; vous ne pouvez pas faire cela avec une feuille sphérique ou hyperboloïdale sans déchirer ou froisser le papier. Cependant, même si le cylindre de la figure 2.7 paraît donc plat pour une fourmi marchant sur une petite région de celui-ci, sa surface semble connectée sur elle-même : la fourmi peut revenir à son point de départ en marchant sur une ligne horizontale droite. Les mathématiciens désignent la connexité d'un espace par *topologie*. Ils ont défini un espace plat qui se connecte à lui-même dans *toutes* ses dimensions, et appellent un tel espace un *tore*. Un tore bidimensionnel possède la même topologie que la surface d'une bouée ou d'un beignet troué en son centre. La théorie d'Einstein permet l'éventualité que l'espace physique dans lequel nous vivons soit un tore

tridimensionnel, qui serait dans ce cas à la fois plat et fini. Mais il pourrait également être infini.

En résumé, l'espace dans lequel nous vivons pourrait se prolonger à l'infini, ou non – les deux alternatives étant tout aussi raisonnables selon la meilleure des théories que nous ayons sur la nature de l'espace, la relativité générale d'Einstein. Alors, qu'en est-il ? Nous reviendrons sur cette question fascinante dans les chapitres 4 et 5, où nous donnerons des preuves que l'espace est véritablement infini. Mais notre réflexion au sujet de la question profonde posée par notre enfant en soulève une autre : qu'est-ce que l'espace, au fond ? Bien que spontanément l'espace soit pour nous quelque chose de *physique*, tissant la véritable étoffe de notre monde matériel, nous voyons désormais comment les mathématiciens parlent des espaces comme s'il s'agissait d'entités *mathématiques*. Pour eux, l'étude de l'espace revient simplement à étudier la géométrie, et la géométrie est une branche des mathématiques. Nous pourrions, en vérité, alléguer que l'espace est un objet mathématique au sens où seules ses propriétés intrinsèques sont des entités mathématiques – des propriétés telles que le nombre de dimensions, la courbure et la topologie. Nous détaillerons davantage cet argument dans le chapitre 10, en proposant que dans un sens bien défini, notre réalité physique tout entière soit un objet purement mathématique.

Nous avons consacré ce chapitre à explorer notre place dans l'espace, levant le voile sur un univers beaucoup plus vaste que l'imaginaient nos ancêtres. Pour comprendre réellement ce qu'il s'y trouve dans les contrées les plus lointaines, nous pouvons l'observer grâce aux télescopes. Néanmoins, il ne suffit pas d'explorer uniquement notre place dans l'espace : nous devons également examiner notre place dans le temps. C'est l'objet du prochain chapitre.

### En bref

- Nous, êtres humains, avons réalisé à plusieurs reprises que notre réalité physique est considérablement plus vaste que nous l'imaginions, et que tout ce que nous appréhendions n'était qu'un élément d'une structure encore plus grande : une planète, un système solaire, une galaxie, un superamas de galaxies, etc.
- La théorie de la relativité générale d'Einstein autorise la possibilité que l'espace se prolonge à l'infini.
- Elle permet également l'option alternative où l'espace serait fini et sans bord, de sorte que si vous pouviez voyager suffisamment loin, vous rejoindriez votre point de départ dans la direction opposée.
- Le véritable tissu de notre monde physique, l'espace lui-même, pourrait être un objet purement mathématique au sens où seules ses propriétés intrinsèques sont des entités mathématiques – des valeurs caractérisant le nombre de dimensions, la courbure et la topologie.