

# **NOTRE UNIVERS MATHÉMATIQUE**



Max Tegmark

# **NOTRE UNIVERS MATHÉMATIQUE**

EN QUÊTE  
DE LA NATURE ULTIME DU RÉEL

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

DUNOD

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

Conception de la couverture : Raphaël Tardif

*Illustration de couverture* : Sphère représentant la frontière de notre Univers observable tel qu'il était 400 000 ans après notre Big Bang.

© ESA, collaboration Planck et Max Tegmark.

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements



d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© Dunod, Paris, 2014, pour la traduction française  
5 rue Laromiguière, 75005 Paris  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-057036-2

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 « d'illustration », « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle fait 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 révélé 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 *Blackebergs 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 de 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?

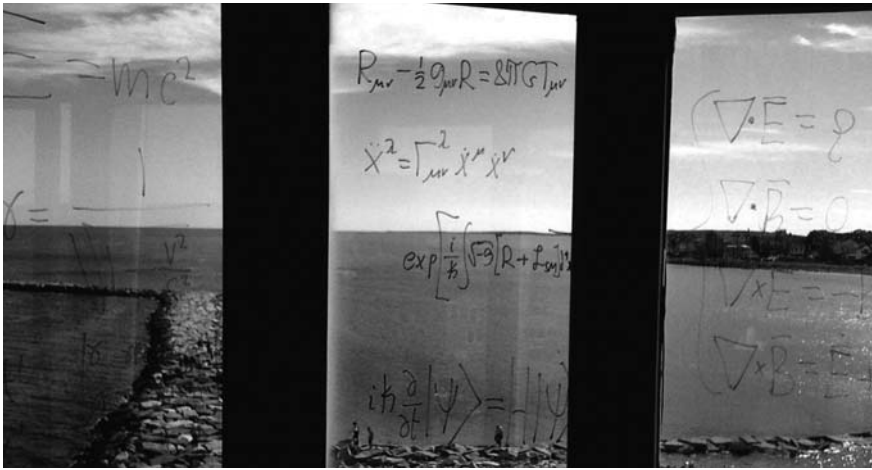
Si vous pensez que ce que je viens d'avancer est absurde et que les physiciens se sont embourbés dans des questions inextricables, alors la situation empire si nous considérons ma perception personnelle du récit. Si je suis présent en deux endroits distincts dans ces univers parallèles, alors l'un de 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 stellaires 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'explorerons 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.





**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.

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, 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 foulèrent 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 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.

Notre Univers est-il infiniment vieux ?	Notre Univers perdurera-t-il éternellement ?	Y a-t-il d'autres univers ?	Si quelque chose a créé notre Univers, quelle est-elle ?
<b>OUI :</b> Hindouisme Bouddhisme  <b>NON :</b> Ahmadiisme Apaches Azèques Babyloniens Baháisme Christianisme Égyptiens Grecs Hopis Islam Judaïsme Mayas Religion nordique Rastafarisme Sumériens Zoroastrisme	<b>OUI :</b> Bouddhisme Grecs Hindouisme Religion nordique Zoroastrisme  <b>NON :</b> Ahmadiisme Apaches Azèques Babyloniens Baháisme Christianisme Égyptiens Hopis Islam Judaïsme Mayas Rastafarisme Sumériens	<b>OUI :</b> Hindouisme  <b>NON :</b> Ahmadiisme Apaches Azèques Babyloniens Baháisme Bouddhisme Christianisme Égyptiens Grecs Hopis Islam Judaïsme Mayas Religion nordique Rastafarisme Sumériens Zoroastrisme	<p>Dieu/dieux :</p> <p>Apaches Azèques Babyloniens Christianisme Hopis Islam Judaïsme Mayas Sumériens Zoroastrisme</p>  <p>Œuf :</p> <p>Égyptiens Finlandais Grecs Hindouisme Taoïsme</p> <p>Éléments :</p> <p>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.

D'autres grandes questions soulevées dès l'Antiquité sont toutes 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 vers 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.

## Qu'est-ce que la réalité ?

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	
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>. 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...

---

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



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 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'informations 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 teints 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

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

**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.

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!

### 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, sommes 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 ?*

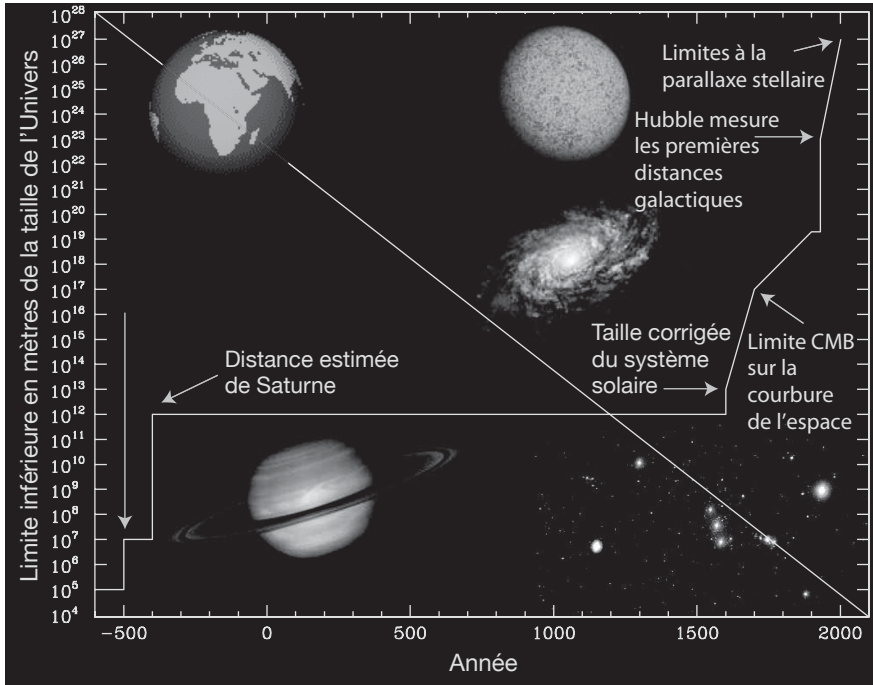
- 10) *Avons-nous une preuve de l'existence de la singularité du Big Bang?*
- 11) *La création de matière, par l'inflation, autour de nous à partir de presque rien ne viole-t-elle pas la conservation de l'énergie?*
- 12) *Qu'est-ce qui a donné naissance à notre Big Bang?*
- 13) *Que s'est-il passé avant 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, 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

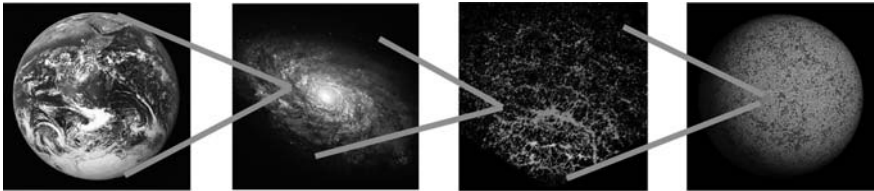
une galaxie, qui participe à la figure cosmique dessinée par un amas de galaxies, lequel fait partie de notre univers observable, qui, comme nous le verrons, contribue à un ou plusieurs niveaux d'univers parallèles.



**Figure 2.1** 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.

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.

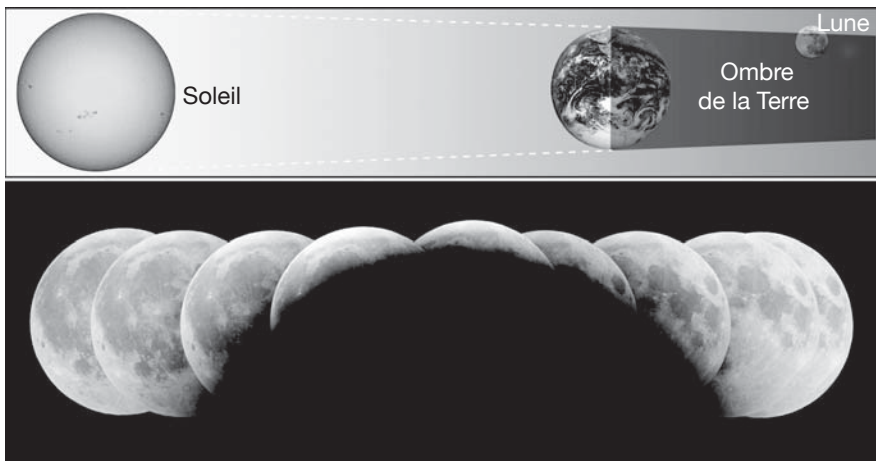


**Figure 2.2** Chaque fois que nous sommes parvenus à prendre de la distance, nous avons découvert que tout ce que nous savions n'était qu'une partie d'un ensemble plus vaste: notre pays est situé sur une planète (à droite), qui appartient à un système solaire, qui compose une galaxie (milieu droit),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

Il n'y a pas de meilleure probabilité 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 à disposition. 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.



**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.)