

Par l'auteur de *L'Univers élégant*

BRIAN
GREENE

Jusqu'à la fin des temps

Notre destin
dans l'univers



Champs sciences

JUSQU'À LA FIN DES TEMPS

DANS LA MÊME COLLECTION

- Albert Einstein, *Comment je vois le monde ; Conceptions scientifiques.*
Albert Einstein et Leopold Infeld, *L'Évolution des idées en physique.*
Florian Freistetter, *Étoiles.*
Brian Greene, *La Réalité cachée.*
Stephen Hawking, *Une belle histoire du temps ; Une brève histoire du temps ; Commencement du temps et fin de la physique ? ; Petite histoire de l'Univers.*
Werner Heisenberg, *La Partie et le Tout.*
Michio Kaku, *Une brève histoire du futur.*
Étienne Klein, *Allons-nous liquider la science ? ; Discours sur l'origine de l'Univers ; Le facteur temps ne sonne jamais deux fois ; Il était sept fois la révolution ; Matière à contredire ; Petit voyage dans le monde des quanta ; Les Tactiques de Chronos ; Tout n'est pas relatif.*
Étienne Klein et Gautier Depambour, *Idées de génies.*
Thomas S. Kuhn, *La Structure des révolutions scientifiques.*
Jean Perrin, *Les Atomes.*
Max Planck, *Autobiographie scientifique et derniers écrits ; Initiations à la physique.*
Henri Poincaré, *La Science et l'hypothèse ; La Valeur de la science.*
Carlo Rovelli, *Écrits vagabonds ; Helgoland ; L'Ordre du temps.*
Marcus du Sautoy, *Ce que nous ne saurons jamais ; Le Code de la créativité.*
Ian Stewart, *17 équations qui ont changé le monde ; La Chasse aux trésors mathématiques ; Dieu joue-t-il aux dés ? ; Les Mathématiques du vivant ; Mon cabinet de curiosités mathématiques.*
Kip S. Thorne, *Trous noirs et distorsion du temps.*
Trinh Xuan Thuan, *Entretiens avec un astrophysicien ; Vertige du cosmos.*
Neil deGrasse Tyson, *L'Univers expliqué aux gens pressés.*
Jean-Philippe Uzan, *Big-bang ; L'Harmonie secrète de l'Univers.*

Brian Greene

JUSQU'À LA FIN DES TEMPS

Notre destin dans l'univers

*Traduit de l'anglais (États-Unis)
par René Cuillierier*

Champs sciences

L'ouvrage original a été publié sous le titre
Until the End of Time
par les Éditions Knopf.

Copyright © 2020 by Brian Greene
© Éditions Flammarion, Paris, 2021, pour la traduction française.
© Éditions Flammarion, Paris, 2023, pour cette édition en « Champs ».
ISBN : 978-2-0804-3129-5

Pour Tracy

Préface

« Je fais des mathématiques parce qu'une fois que tu prouves un théorème, il tient bon. Pour toujours ¹. » L'affirmation, simple et directe, me parut saisissante. J'étais alors en deuxième année à l'université, et j'écrivais une dissertation sur la motivation humaine pour un cours de psychologie auquel j'étais inscrit. Je venais d'en discuter à un ami plus âgé, qui m'avait enseigné de vastes domaines des mathématiques pendant des années. Sa réponse fut une révélation.

Jusque-là, je n'avais jamais pensé aux mathématiques en des termes un tant soit peu approchants. Pour moi, les gens bizarres qui faisaient des maths, capables de rire à des blagues sur les racines carrées et la division par zéro, s'adonnaient à des jeux étranges, d'une précision abstraite. Mais, avec la remarque de mon ami, les engrenages s'étaient soudain mis en place. *Oui*, pensai-je. *Tout le charme des mathématiques est là*. La logique, alliée à un ensemble d'axiomes, guide la créativité humaine ; et elle nous permet ainsi de manipuler les idées et de les combiner pour révéler des vérités éternelles.

Tous les triangles rectangles, qu'ils aient été dessinés bien avant Pythagore ou qu'ils le soient jusqu'à la fin des temps, ont satisfait, satisfont et satisferont le célèbre théorème qui porte son nom. Il ne souffre aucune exception. Certes, vous pouvez modifier vos hypothèses de départ et vous retrouver à explorer de nouveaux domaines – un triangle dessiné sur une surface courbe, telle que celle d'un ballon de basket, prendra en défaut les

conclusions de Pythagore. Mais définissez vos hypothèses, vérifiez bien vos raisonnements, et vos résultats seront prêts à être gravés dans le marbre. Nul besoin de gravir des montagnes, d'errer dans le désert ou d'affronter les enfers ! Il suffit de rester confortablement assis à son bureau avec un papier et un crayon et d'exercer sa sagacité pour créer quelque chose d'éternel.

Bref, mon monde s'élargissait brusquement. À vrai dire, je ne m'étais jamais vraiment demandé *pourquoi* j'étais profondément fasciné par les mathématiques et la physique. Résoudre des problèmes, apprendre comment fonctionne l'univers – voilà ce qui m'avait toujours subjugué. Désormais, j'étais convaincu d'avoir été attiré par ces disciplines parce qu'elles transcendaient le caractère fugace du quotidien. Certes, ma sensibilité de jeune homme dramatisait sans doute l'importance de mon engagement. Mais, moi aussi, je voulais prendre part à cette quête de résultats si définitifs qu'ils ne changeront jamais – j'en eus soudain la certitude. Que passent les gouvernements, que la Coupe du monde soit gagnée puis perdue, que les stars du cinéma, de la télévision et du théâtre connaissent la gloire puis tombent dans l'oubli : je consacrerai ma vie à tenter de saisir un aperçu de la transcendance.

En attendant, j'avais encore cette dissertation à écrire pour mon cours de psychologie... L'énoncé demandait de développer une théorie sur les raisons qui poussent les êtres humains à faire ce qu'ils font, mais, à chaque fois que je commençais à écrire, l'entreprise m'apparaissait franchement nébuleuse. J'avais l'impression de pouvoir dire tout et n'importe quoi, tant que les idées alignées étaient rédigées dans un langage approprié et restaient raisonnables en apparence. J'en parlai donc au dîner à la résidence universitaire, et un des tuteurs résidents me suggéra alors de feuilleter le *Déclin de l'Occident* d'Oswald Spengler. Philosophe et historien allemand, Spengler avait un grand respect pour les mathématiques et pour la science, ce qui, à n'en pas douter, était la raison pour laquelle son livre m'avait été conseillé.

Les aspects de ce livre qui font sa mauvaise réputation – des prédictions politiques catastrophistes et une adhésion à peine voilée au fascisme – sont profondément dérangeants, et ont servi

depuis à justifier des idéologies fallacieuses ; mais j'étais trop concentré sur mon problème pour les avoir remarqués à l'époque. Bien plutôt, je fus intrigué par la vision que développait Spengler : un ensemble de principes universels qui révélaient des schémas cachés, et ce dans toutes les cultures, aussi différentes soient-elles. Une sorte d'axiomatique, comme celles sur lesquelles reposent le calcul infinitésimal ou la géométrie euclidienne, ces mêmes disciplines qui ont transformé notre compréhension de la physique et des mathématiques². Là, Spengler parlait le même langage que moi. Je trouvais excitant qu'un ouvrage d'histoire élève les maths en modèle à suivre. J'en étais là dans ma réflexion et poursuivais ma lecture quand un passage me prit au dépourvu : « L'Homme est le seul être qui connaisse la mort. Tous les autres vieillissent, mais leur conscience est entièrement limitée à l'instant présent, qui doit pour eux paraître éternel », et cette connaissance instille « une peur de la mort qui est essentiellement un attribut humain ». Spengler en concluait que « toute religion, toute recherche scientifique, toute philosophie procède de cette peur³ ».

Je me souviens de m'être arrêté longuement sur cette dernière phrase. Elle révélait un point de vue sur les motivations humaines que je pouvais comprendre. Le charme d'une démonstration mathématique est certes de résister au temps, et l'attrait d'une loi de la nature se trouve dans son caractère essentiellement intemporel. Mais qu'est-ce qui nous pousse à rechercher ce qui est éternel – ce qui, dans notre réalité, est susceptible de persister à jamais ? Et si cela dérivait de la conscience que nous avons d'être tout sauf immortels, qu'en aucun cas nos vies ne dureront toujours ? L'idée résonnait fortement avec mes toutes nouvelles réflexions sur les maths, la physique, et notre attirance pour l'éternité. En un mot, elle semblait taper dans le mille. Cette approche des motivations humaines reposait sur une réaction vraisemblable face à une certitude universelle. Elle n'était pas une simple élucubration montée de toutes pièces.

Plus j'y réfléchissais, plus cette conclusion semblait ouvrir des perspectives grandioses. La science, comme l'avait noté Spengler, est une des réponses possibles à la certitude de notre fin. De

même que la religion. Et la philosophie. Mais au fait, pourquoi s'arrêter en si bon chemin ? Il n'y a aucune raison, pensait Otto Rank, un des premiers disciples de Freud qui était fasciné par le processus créatif humain. L'artiste, selon lui, est aussi une personne dont « la pulsion créatrice [...] tente de transformer une vie éphémère en immortalité personnelle⁴ ». Jean-Paul Sartre allait même plus loin, en constatant que la vie était vidée de tout sens « quand on a perdu l'illusion d'être éternel⁵ ». Ce que suggéraient ces auteurs et bien d'autres qui suivirent, c'est que l'essentiel de la culture humaine – de l'exploration artistique aux découvertes scientifiques – découle du fait que la vie s'est mise à réfléchir sur sa nature finie.

Vertigineux... Qui eût cru que des considérations autour des mathématiques et de la physique déboucheraient sur la perspective d'une théorie unifiée de la civilisation humaine, fondée sur le dualisme entre la vie et la mort ?

Bon, d'accord. Je vais essayer de ne pas trop m'emballer, et d'oublier l'étudiant de deuxième année que je fus autrefois. Pourtant, l'excitation de l'époque s'avéra être plus qu'un feu de paille intellectuel. Au cours des quarante ans ou presque qui ont suivi, ces thématiques m'ont accompagné, bruissant souvent dans mon esprit en tâche de fond. Mon travail quotidien était consacré aux théories unifiées et aux origines du cosmos, mais, lorsque je ruminais sur le sens plus général des avancées scientifiques, je me suis régulièrement surpris à revenir à la question de la durée finie qui nous est allouée dans ce monde. Or, de par ma formation aussi bien que par tempérament, je me méfie des explications globales toutes faites – la physique est littéralement jonchée de brouillons de théories visant à unifier les forces de la nature –, encore plus si elles s'aventurent dans le champ, complexe, du comportement humain. Certes, la conscience que j'ai de ma propre fin inévitable a une influence considérable sur mes actions, mais j'ai fini par comprendre qu'elle ne suffit pas à toutes les expliquer. C'est une analyse qui, j'imagine, est assez banale.

Et, cependant, il est un domaine dans lequel les menaces de la Grande Faucheuse sont flagrantes. À travers les époques et les

cultures, nous avons attribué une valeur importante à la permanence. Et ce de nombreuses et diverses manières : certains cherchent des vérités absolues ; d'autres se démènent afin de léguer quelque chose de durable, construisent des monuments formidables ou recherchent des lois immuables ; et d'autres encore se tournent avec ferveur vers une version ou une autre de l'immortalité. L'éternité, comme ces préoccupations le démontrent, attire puissamment les esprits qui sont conscients de leur durée limitée.

À notre époque, les scientifiques, équipés des outils que sont l'expérience, l'observation et l'analyse mathématique, ont frayé une nouvelle voie vers le futur ; une piste qui pour la première fois a révélé les contours essentiels du paysage à venir, bien qu'il soit encore très lointain. Il reste obscurci et embrumé par endroits, mais le panorama devient aujourd'hui suffisamment clair pour que plus que jamais, nous autres, les créatures pensantes, puissions y glaner quelque idée qui éclaire notre place dans l'immensité du temps.

C'est dans cet esprit que nous allons parcourir la chronologie cosmique dans les pages qui suivent, en étudiant les principes qui produisent les structures ordonnées, depuis les étoiles et les galaxies jusqu'à la vie puis la conscience, au sein d'un univers destiné au déclin. Nous nous arrêterons sur les arguments qui établissent que, dans cet univers, le phénomène de la vie consciente aura lui-même une durée limitée. Il est en effet probable que l'existence de toute matière organisée devienne impossible dans le futur. Nous examinerons comment faire face à ces découvertes. Les êtres humains sont les produits de lois qui, pour autant que nous le sachions, sont immuables, et pourtant, nous ne sommes voués à exister que pendant une durée extrêmement brève. Ces lois sont absolument dépourvues d'intention ou de finalité, et semblent ne découler d'aucune justification sous-jacente ; et pourtant, nous passons notre temps à nous demander où nous allons. Nous persistons à rechercher la signification et le but de toute chose.

En somme, dans ce livre, nous sonderons l'univers depuis l'origine des temps jusqu'à leur fin, ou du moins jusqu'à un

moment qui s'y apparente. Tout au long du voyage, nous étudierons comment des esprits infatigables et inventifs ont éclairé le caractère fondamentalement éphémère de tout ce qui existe, et comment ils y ont réagi.

Au cours de notre exploration, nous serons guidés par des notions issues de disciplines scientifiques variées. J'éviterai les termes techniques et j'expliquerai toutes les idées nécessaires au moyen d'analogies et de métaphores, ne prenant pour acquis chez le lecteur qu'un bagage des plus modestes. Pour les concepts particulièrement exigeants, je proposerai de brefs résumés qui permettront d'avancer sans perdre le fil. Quant aux notes de fin, j'y précise des subtilités, explicite parfois des détails mathématiques et suggère également des références pour aller plus loin.

Puisque le sujet est vaste et le nombre de pages limité, j'ai choisi de suivre un chemin étroit, et de ne faire une pause qu'à certaines bifurcations que je considère comme essentielles pour prendre conscience de notre place au sein de l'histoire cosmique. La science sera le carburant de ce voyage ; et seule l'humanité, à la fois témoin et actrice de l'histoire, donnera un sens à cette aventure qui s'annonce à la fois riche et intense.

L'APPEL DE L'ÉTERNITÉ

Des origines jusqu'à la fin et au-delà

Avec le temps, tout ce qui est vivant mourra. Sur Terre, pendant plus de trois milliards d'années, alors que les organismes plus ou moins complexes trouvaient leur place dans la hiérarchie des espèces, la vie a fleuri à l'ombre de la Grande Faucheuse. Elle s'est certes diversifiée, tandis qu'elle rampait hors de l'eau, prenait pied sur la terre et s'envolait dans les airs. Mais, si vous attendez assez longtemps, vous constaterez que dans le grand registre des naissances et des décès – un livre qui compte déjà plus d'entrées que d'étoiles dans la galaxie – les colonnes finissent toujours par s'équilibrer avec une froide précision. Si le déroulement d'une vie singulière est impossible à prévoir, son issue est courue d'avance.

Cette fin chaque jour un peu plus proche, aussi inéluctable que le coucher du Soleil, seuls nous, les humains, semblons en avoir conscience. Bien sûr, longtemps avant notre apparition, le fracas des tempêtes, la puissance furieuse des volcans, le frémissement saccadé d'une terre qui tremble ont certainement provoqué la fuite de tous les êtres qui avaient le pouvoir de le faire. Ces fuites ne sont cependant que des réactions instinctives face à un danger imminent. La plupart des êtres vivants ne vivent qu'au présent et ne craignent que ce que leur rapportent leurs perceptions immédiates. Il n'y a que vous, moi et le reste de nos congénères qui puissions réfléchir au passé lointain, imaginer le futur et deviner les ténèbres qui nous attendent.

Cette vision est proprement terrifiante. Il ne s'agit pas de cette peur qui nous fait fuir pour nous mettre à l'abri, mais d'un funeste pressentiment qui se niche en nous et que nous apprenons à refouler, à accepter, à prendre avec légèreté. Cependant, la certitude inquiétante de ce qui nous attend subsiste en permanence, cachée sous toutes sortes de rationalisations. William James la décrivait comme « un ver qui ronge toutes nos sources quotidiennes de bonheur¹ ». Travailler, se divertir, nourrir des projets et redoubler d'efforts, désirer et aimer, s'intégrer chaque jour un peu plus à la grande toile des existences humaines, tout cela pour finalement ne plus être... Franchement, pour paraphraser l'humoriste Steven Wright, il y a de quoi vous faire à moitié mourir de peur. Deux fois !

Bien sûr, pour notre tranquillité d'esprit, nous n'avons pas, pour la plupart, l'œil fixé sur la fin. Nous allons de par le monde, concentrés sur des problèmes concrets. Nous acceptons l'inévitable et consacrons nos forces à d'autres choses. Et pourtant, la notion de notre finitude ne nous abandonne jamais, mais influence au contraire les choix que nous faisons, les défis que nous relevons, les voies que nous empruntons. Comme l'affirmait l'anthropologue culturel Ernest Becker, nous sommes soumis à une tension existentielle permanente, tirés vers le ciel par une conscience qui s'élève parfois jusqu'aux hauteurs d'un Shakespeare, d'un Beethoven ou d'un Einstein, mais enchaînés à la terre par une structure physique destinée à redevenir poussière. « L'Homme est littéralement scindé en deux : conscient de son admirable unicité tandis qu'il s'élève majestueusement au-dessus de la nature, il retournera pourtant quelques mètres sous terre pour bêttement et aveuglement y pourrir et y disparaître à jamais². » Selon Becker, cette conscience nous pousse à contester à la mort le pouvoir de nous effacer.

Certains soulagent leur angoisse existentielle en se consacrant à leur famille, à leur équipe, à un mouvement, à une religion, ou encore à une nation – des constructions sociales qui survivent au temps limité alloué à chacun. D'autres laissent derrière eux des expressions artistiques, ou des objets qui prolongent symboliquement la durée de leur présence au monde. « Nous fuyons

vers la Beauté comme vers un refuge contre les terreurs de la finitude », écrivait Emerson³. D'autres encore cherchent à vaincre la mort à travers les victoires et les conquêtes, comme si le statut social, le pouvoir ou la richesse offraient une protection par ailleurs inaccessible au commun des mortels.

Au cours des millénaires, cela s'est traduit par une fascination universellement partagée envers tout ce qui, réel ou imaginaire, touche à l'éternité. Pour affronter le fait que nous sommes mortels, nous avons développé de nombreux stratagèmes : les prophéties sur la vie après la mort, les doctrines qui promettent la réincarnation, les suppliques d'un mandala soufflé par le vent, et tant d'autres. Souvent pleins d'espoir, parfois résignés, nous cherchons sans cesse à gagner l'éternité. Toutefois, quelque chose a changé à notre époque : la science peut désormais nous raconter une histoire remarquablement lucide non seulement du passé, en remontant jusqu'au Big Bang, mais aussi du futur. L'éternité elle-même restera peut-être à jamais hors d'atteinte de nos équations, mais nos investigations ont déjà révélé que l'univers que nous avons appris à connaître est transitoire. Planètes, étoiles, systèmes solaires, galaxies, trous noirs ou nébuleuses tourbillonnantes, rien de tout cela n'est éternel.

En fait, pour autant que nous sachions, non seulement la durée de chaque existence individuelle est finie, mais c'est aussi le cas de la vie elle-même. La planète Terre, que Carl Sagan décrivait comme « un grain de poussière suspendu dans un rayon de soleil », est une floraison évanescence au sein d'un univers merveilleux, condamné à n'être un jour plus qu'un désert. Qu'ils soient proches ou lointains, les grains de poussière ne dansent qu'un instant dans les rayons d'un soleil.

Et cependant, ici sur Terre, nous avons su orner notre époque d'exploits stupéfiants. Chaque génération, en s'appuyant sur l'œuvre des précédentes, a déployé des trésors d'intuition, de créativité et d'ingéniosité pour tenter d'éclaircir la manière dont tout en est venu à exister, de comprendre ce que tout deviendra, et de finalement répondre à cette question pressante : tout cela a-t-il une quelconque importance ?

Telle est l'histoire que raconte ce livre.

Des histoires sur à peu près tout

Notre espèce adore les histoires. Nous observons en effet la réalité, y décelons des schémas récurrents et les assemblons pour créer des récits capables de fasciner, d'étonner, d'informer, d'amuser et de passionner. J'écris « récits » au pluriel, car, dans la grande bibliothèque des réflexions humaines, aucun volume ne saurait livrer à lui seul une compréhension ultime et unifiée des choses. Au contraire, pour sonder les différents domaines de la recherche et de l'expérience humaine, il faut faire appel à de nombreuses histoires emboîtées les unes dans les autres. Ces histoires distillent les structures de la réalité au moyen de grammaires et de vocabulaires différents.

Les protons, les neutrons, les électrons et les autres particules élémentaires sont fondamentaux pour raconter l'histoire réductionniste, pour étudier l'étoffe de la réalité, des planètes jusqu'à Picasso, en termes d'entités microphysiques. Métabolisme, répllication, mutation et adaptation, tels sont les termes avec lesquels on peut raconter l'histoire de la vie : son émergence, son développement ultérieur, ainsi que le fonctionnement biochimique de certaines molécules remarquables et des cellules qu'elles gouvernent. Les notions de neurones, d'information, de pensée et de conscience sont indispensables à l'histoire de l'esprit. Et, à partir de là, les récits prolifèrent : les mythes et les religions, la littérature et la philosophie, l'art et la musique racontent la lutte de l'humanité pour sa survie, sa volonté de comprendre, sa soif d'expression et sa quête de sens.

Toutes ces histoires sont en cours d'écriture, développées par des penseurs issus d'un large panel de disciplines distinctes. Et c'est bien normal. Une saga qui embrasse la réalité des quarks jusqu'à la conscience, c'est un sacré morceau. Il faut noter que ces histoires sont reliées entre elles. Par exemple, *Don Quichotte* nous parle du désir humain d'héroïsme à travers les aventures du fragile Alonso Quijano, un personnage issu de l'imagination de Miguel de Cervantes. Cervantes, pour sa part, était une collection vivante, sensible, respirante et pensante d'os, de tissus et de

cellules qui, de son vivant, fut le siège de processus organiques comme la conversion d'énergie et l'excrétion de déchets. Ces processus se fondaient eux-mêmes sur des mouvements moléculaires affinés par des milliards d'années d'évolution, sur une planète forgée à partir de restes dispersés par l'explosion de supernovas, dans une région de l'espace qui avait émergé du Big Bang... Cependant, les exploits de *Don Quichotte* nous livrent une compréhension de la nature humaine qui demeurerait opaque si elle en restait à la description complète du mouvement des particules qui constituent le chevalier errant, ou à la reconstitution des processus neuronaux qui fulguraient dans l'esprit de Cervantes pendant qu'il écrivait son roman. Ainsi, bien qu'elles soient interconnectées, toutes ces histoires sont racontées dans des langages distincts, décrivent divers niveaux de la réalité et fournissent des points de vue sur le monde considérablement différents.

Peut-être serons-nous un jour en mesure de passer sans heurt de chacune de ces histoires à n'importe quelle autre, de connecter tous les produits de l'esprit humain, réels ou fictifs, scientifiques ou imaginaires. Peut-être pourrons-nous un jour invoquer une théorie unifiée des particules pour expliquer ce que c'est que de voir un Rodin, ou décrire la myriade de réactions différentes qu'une œuvre comme *Les Bourgeois de Calais* provoque chez ceux qui la contemplent. Peut-être comprendrons-nous complètement l'impact qu'un détail aussi banal en apparence qu'un reflet sur une assiette tournante est susceptible d'avoir sur le puissant esprit d'un Richard Feynman, au point qu'il se sente obligé de réécrire les lois fondamentales de la physique. But plus ambitieux encore, peut-être saisirons-nous le fonctionnement de l'esprit et de la matière si parfaitement que tout sera révélé, des trous noirs à la musique de Beethoven, des bizarreries de la mécanique quantique à la poésie de Walt Whitman.

Même si nous ne disposons de rien de tel aujourd'hui, il reste enrichissant de s'immerger dans ces histoires – scientifiques, imaginaires ou artistiques –, tout comme il est enrichissant de découvrir quand et comment elles ont émergé de versions antérieures, disponibles tout au long de l'histoire cosmique. On peut

ainsi remonter le fil des élaborations, qu'elles soient douteuses ou concluantes, qui ont élevé chacune de ces versions à leur place explicative actuelle⁴.

À travers cette collection d'histoires, nous verrons que deux forces se partagent le rôle de personnage principal. Au chapitre 2, nous rencontrerons la première : l'*entropie*. Elle nous est familière parce qu'elle est associée au désordre, et qu'on a souvent lu ici ou là l'affirmation selon laquelle le désordre ne peut qu'augmenter. L'entropie possède cependant des qualités subtiles grâce auxquelles les systèmes physiques disposent d'une riche variété de voies de développement possibles, au point de paraître parfois nager contre le courant entropique. Nous en verrons des exemples importants au chapitre 3, lorsque, à l'issue du Big Bang, certaines particules semblent être allées contre la tendance au désordre en formant les structures organisées que sont les galaxies, les étoiles, les planètes et, enfin, les configurations de matière qui sont apparues avec le jaillissement de la vie. La question de savoir comment s'enclenche ce jaillissement nous amène à la seconde des grandes forces universelles : l'*évolution*.

L'évolution par sélection naturelle est la force motrice à l'origine des transformations graduelles que subissent les systèmes vivants. Elle est néanmoins intervenue bien avant que les premières formes de vie ne commencent à entrer en compétition. Au chapitre 4, nous observerons des molécules affronter d'autres molécules – une série de luttes pour la survie menées dans l'arène de la matière inanimée. Round après round, ce « darwinisme moléculaire » – tel est le nom donné à ces affrontements – a probablement produit une série de configurations toujours plus robustes, jusqu'à ce qu'apparaisse la première collection de molécules que nous pourrions reconnaître comme vivante. Les détails relèvent encore de la recherche de pointe, mais les progrès spectaculaires des vingt dernières années nous font penser que nous sommes sur la bonne voie, du moins dans les grandes lignes.

En fait, il se pourrait bien que les forces antagonistes de l'entropie et de l'évolution soient les deux faces d'une même pièce, à l'origine de la vie. Bien sûr, elles sont à première vue très mal assorties : la réputation de l'entropie la rapproche du

chaos, tandis que l'évolution du vivant semble être son antithèse. Toutefois, des analyses mathématiques récentes de l'entropie suggèrent que la vie (ou du moins des structures qui présentent des caractéristiques proches) est peut-être précisément le résultat auquel on devrait *s'attendre* lorsqu'une source d'énergie durable, comme le Soleil, déverse chaleur et lumière sur des ingrédients moléculaires se trouvant en compétition pour les ressources limitées d'une planète, comme la Terre.

Aussi hypothétiques que demeurent ces idées pour le moment, une chose est sûre : environ un milliard d'années après la formation de la Terre, celle-ci grouillait déjà de formes de vie qui se développaient sous les pressions évolutives. Par conséquent, la phase suivante de l'histoire s'est faite au tarif darwinien standard. Des événements aléatoires, comme le fait d'être touché par un rayon cosmique ou de subir un accident moléculaire pendant la réplication de l'ADN, ont provoqué des mutations au hasard. Si ces mutations sont pour la plupart sans grand impact sur la santé ou le bien-être de l'organisme, certaines le rendent plus ou moins apte à la compétition pour survivre. Parmi elles, celles qui augmentent cette aptitude sont plus susceptibles d'être transmises à la descendance, parce que être « plus apte » veut dire avoir plus de chances de survivre jusqu'à la maturité sexuelle et de produire une progéniture nombreuse. De génération en génération, les qualités qui ont accru l'aptitude des organismes se répandent largement.

Au bout de quelques milliards d'années de ce long processus, une série particulière de mutations a offert à certaines formes de vie de meilleures capacités cognitives. Certains êtres vivants devinrent alors non seulement conscients, mais conscients d'être conscients. Autrement dit, une partie de la vie est devenue consciemment consciente. Ces êtres capables d'introspection devaient fatalement se poser la question de ce qu'est la conscience elle-même : comment un tourbillon aveugle de matière peut-il penser et ressentir ?

De nombreux chercheurs s'attendent à ce que l'explication soit finalement mécaniste ; nous en discuterons au chapitre 5. Selon eux, il nous reste encore à comprendre le cerveau – ses

composants, leur fonctionnement et leurs connexions – bien plus en détail qu'aujourd'hui, mais, une fois que nous disposerons de ces connaissances, l'explication de la conscience en découlera naturellement. D'autres chercheurs prévoient à l'inverse que le défi sera bien plus grand. Ils estiment que la conscience est l'énigme la plus difficile que nous ayons jamais rencontrée, et que cette énigme exigera un point de vue radicalement différent, non seulement sur la nature de l'esprit, mais aussi sur la nature de la réalité elle-même.

Tout le monde est cependant d'accord pour dire que notre sophistication cognitive a eu un impact considérable sur le répertoire des comportements à notre disposition. Au cours du Pléistocène, pendant des dizaines de milliers de générations, nos ancêtres s'assemblèrent en groupes et ont vécu de la chasse et de la cueillette. Avec le temps, leur agilité mentale croissante les a dotés de capacités raffinées de planification, d'organisation, de communication, d'apprentissage, d'évaluation et d'élucidation. Tirant profit des facultés accrues des individus qui les composaient, les groupes commencèrent à exercer des forces communautaires de plus en plus grandes. Ce point nous amène à la collection suivante d'épisodes explicatifs, qui se concentrent désormais sur les processus qui firent de nous ce que nous sommes. Au chapitre 6, nous examinerons l'acquisition du langage par l'homme et son obsession pour les histoires, qui en découle. Le chapitre 7 étudiera un genre particulier d'histoires : celles qui préfigurèrent, puis se transformèrent en traditions religieuses. Enfin, le chapitre 8 explorera la longue et universelle recherche de l'expression artistique.

Pour expliquer l'origine de ces développements, aussi bien sacrés que profanes, les chercheurs ont invoqué une grande variété de théories. Quant à nous, l'évolution darwinienne, appliquée cette fois aux comportements humains, continuera d'être notre fil rouge. Après tout, le cerveau n'est qu'une structure biologique parmi toutes celles qui évoluent sous l'effet de la pression de sélection, et c'est du cerveau que procèdent nos actions et nos réactions.

Ces dernières décennies, les chercheurs en sciences cognitives et les psychologues évolutionnistes ont développé cette idée. Ils ont établi que la sélection darwinienne a façonné notre biologie comme notre comportement. C'est pourquoi, lors de notre cheminement à travers la culture humaine, nous aurons souvent à nous demander si tel ou tel comportement pourrait avoir amélioré les perspectives de survie et de reproduction parmi ceux qui commencèrent à l'adopter il y a longtemps, accélérant et généralisant ainsi sa propagation auprès des générations suivantes. Toutefois, contrairement au pouce opposable ou à la station debout – des traits physiologiques héréditaires étroitement liés à des comportements adaptatifs spécifiques –, la plupart des caractéristiques héréditaires du cerveau n'induisent que des prédispositions plutôt que des actions bien définies. Nous sommes influencés par ces tendances, mais l'activité humaine est le produit d'un mélange de bien des traits différents au sein de nos esprits complexes, capables d'introspection et de débat interne.

Nous suivrons donc un second fil rouge, distinct mais non moins important : celui de la vie intérieure, qui va de pair avec nos capacités cognitives raffinées. En marchant sur les pas de nombreux penseurs, nous en arriverons à une vue d'ensemble saisissante : avec la cognition humaine, il ne fait aucun doute que nous avons lié notre sort à une force considérable, qui nous a conduits à devenir l'espèce dominante sur toute la Terre. Or ces facultés mentales, grâce auxquelles nous façonnons, bâtissons et innovons, sont précisément celles qui chassent la myopie qui, autrement, nous tiendrait concentrés sur le moment présent. Le fait de pouvoir manipuler notre environnement de façon réfléchie nous donne la capacité de déplacer notre point de vue, de nous élever au-dessus de la ligne du temps, de contempler ce qui fut et d'imaginer ce qui sera. Que cela nous plaise ou non, parvenir au stade du « je pense, donc je suis », c'est se précipiter la tête la première vers son corollaire : « je suis, donc je vais mourir ».

Voilà une conclusion troublante, c'est le moins qu'on puisse dire. Pourtant, pour la plupart, nous parvenons à faire avec. Et nos semblables ont été capables d'en faire autant – notre survie en tant qu'espèce l'atteste. Mais comment y parvenons-nous ⁵ ?

Une explication possible est que nous nous racontons sans cesse des histoires dans lesquelles notre place au sein d'un univers immense migre vers le devant de la scène.

Ainsi, nous contestons, voire ignorons, l'éventualité d'être effacés pour toujours ; ou, pour le dire simplement, ce n'est même pas envisageable. Nous élaborons des œuvres d'art – peinture, sculpture, danse et musique – par lesquelles nous luttons pour contrôler le processus créatif et nous nous rendons capables de triompher de tout ce qui est fini. Nous imaginons des héros comme Hercule, Sire Gauvain ou Hermione, qui regardent la mort en face avec une détermination d'acier et démontrent, bien que de manière fantaisiste, que nous sommes capables d'en triompher. Nous développons aussi les sciences, afin d'acquérir un aperçu du fonctionnement de la réalité ; et nous tirons d'elles des pouvoirs que les générations précédentes auraient réservés aux dieux. En bref, nous parvenons à avoir le beurre et l'argent du beurre : la souplesse de pensée qui, à côté de beaucoup d'autres choses, révèle à nos yeux notre impasse existentielle inéluctable et la capacité de tout de même en profiter. Grâce à nos facultés créatives, nous avons bâti de formidables défenses contre ce qui, autrement, aurait été une angoisse incapacitante...

Pour autant, vu que les motivations ne laissent pas de traces fossiles, retrouver les origines du comportement humain est une entreprise épineuse. Peut-être nos percées créatrices, des cervidés dessinés à Lascaux aux équations de la relativité générale, ne sont-elles que les sous-produits accidentels d'une capacité naturellement sélectionnée du cerveau : celle de détecter frénétiquement des schémas récurrents dans la réalité et de les organiser de façon cohérente. Ces réalisations, comme d'autres du même genre, pourraient simplement être les produits (certes raffinés, mais superflus d'un point de vue adaptatif) de tout cerveau suffisamment gros, libéré du fardeau de rechercher à temps plein abri et nourriture. Comme nous le verrons, les théories qui vont dans ce sens abondent, mais les conclusions indiscutables sont plutôt rares. Il ne fait toutefois aucun doute que nous imaginons, que nous créons et que nous jouissons d'œuvres qui, des pyramides à la *Neuvième Symphonie* en passant par la mécanique

quantique, sont des monuments au génie humain, et dont la longévité, sinon le contenu, tend à la permanence.

Enfin, après avoir considéré les origines du cosmos, exploré la formation des atomes, des étoiles et des planètes, parcouru l'histoire de l'émergence de la vie, de la conscience et de la culture, nous plongerons nos regards dans l'abîme qui, depuis des millénaires, au sens propre comme au sens figuré, a tout à la fois aiguillonné et soulagé notre angoisse cosmique. Nous contemplerons l'éternité.

L'information, la conscience et l'éternité

L'éternité, ce n'est pas pour tout de suite. Beaucoup de choses vont se produire d'ici là. D'intrépides futuristes et nombre de superproductions de science-fiction hollywoodiennes évoquent ce que deviendront la vie et la civilisation sur des durées qui, bien que considérables comparées à une vie humaine, ne sont rien à l'échelle des temps cosmiques. À partir de la courbe de croissance exponentielle de l'innovation technologique, ou plutôt d'un petit bout de cette courbe, il est divertissant d'essayer d'extrapoler ce que seront les futurs développements, bien que la façon dont les choses se dérouleront effectivement ait toutes les chances de différer profondément des prédictions. Et nous parlons là de durées assez familières, de l'ordre de quelques décennies, siècles, ou millénaires. À l'échelle des temps cosmiques, il est illusoire de chercher à prédire de tels détails. Fort heureusement, dans le cadre qui nous concerne ici, nous nous appuierons sur un socle bien plus solide. Mon intention est de peindre avec vous une fresque du futur de l'univers riche en couleurs, mais seulement à très grands traits. En choisissant ce niveau de détail, nous pourrions déjà nous représenter les différentes possibilités avec un certain degré de confiance.

Admettons-le : l'idée de laisser une trace dans un futur dépourvu de tout témoin susceptible de la remarquer a peu de chances de nous procurer une profonde sérénité émotionnelle.

Le futur auquel nous pensons spontanément, fût-ce implicitement, est un futur peuplé des choses qui nous importent. L'évolution poussera certainement la vie et l'esprit à prendre des formes variées sur des supports matériels divers – biologiques, digitaux, hybrides, ou que sais-je encore. Cependant, même si la composition physique détaillée de cette toile de fond est impossible à prédire, la plupart d'entre nous imaginent que, dans un lointain futur, existera et pensera une forme de vie d'un genre ou d'un autre, et plus particulièrement une forme de vie intelligente.

Parvenu à ce stade de la réflexion, on doit poser une question qui nous accompagnera tout au long du voyage : la pensée consciente peut-elle exister éternellement ? L'esprit pensant ne serait-il pas, tel le tigre de Tasmanie ou le pic à bec ivoire, une chose sublime, destinée à apparaître un bref instant avant de s'éteindre à jamais ? Je ne parle pas ici d'une quelconque conscience individuelle, de sorte que la question n'a rien à voir avec ces technologies tant désirées – cryogéniques, numériques ou autres –, capables de préserver l'esprit d'une personne. Je me demande plutôt si le phénomène même de la pensée est susceptible de persister arbitrairement loin dans le futur, que son support soit un cerveau humain, un ordinateur intelligent, un nuage de particules intriquées flottant dans le vide ou n'importe quel autre procédé physique qui remplit les conditions requises.

Pourquoi ne serait-ce pas le cas ? Eh bien, pensez à l'incarnation humaine de la pensée. Elle est apparue conjointement à un ensemble de contingences environnementales qui expliquent pourquoi, par exemple, c'est ici que nous pensons, et non sur Mercure ou sur la comète de Halley. Nous pensons donc ici, et pas ailleurs, parce que les conditions sur notre planète sont favorables à la vie, et à la vie pensante – ce qui, au passage, est précisément la raison pour laquelle les changements climatiques délétères actuels sont si inquiétants. Il n'est toutefois pas du tout évident que le cosmos partage à grande échelle cette inquiétude si lourde de conséquences, mais si étroitement liée à notre petite condition. Si nous considérons la pensée comme un processus physique (nous examinerons cette supposition en temps voulu),

il n'est pas surprenant qu'elle ne puisse avoir lieu que lorsque certaines conditions bien précises sont satisfaites, que ce soit sur Terre, ici et maintenant, ou quelque part ailleurs et à une autre époque. Ainsi, en traçant à grands traits l'histoire future de l'univers, nous déterminerons si les conditions physiques en constante évolution à travers l'espace et le temps sont susceptibles ou non d'entretenir la vie intelligente indéfiniment.

Pour cette esquisse, les découvertes venues de la physique des particules, de l'astrophysique et de la cosmologie nous donneront les moyens de prédire l'évolution future de l'univers sur des durées immensément plus longues que celle qui nous sépare aujourd'hui du Big Bang. Subsistent bien sûr de considérables incertitudes et, comme tous les scientifiques, j'espère que la nature rabattra notre prétention et nous surprendra d'une manière que nous sommes pour le moment incapables d'imaginer. Mais, si l'on se fonde sur nos mesures, nos observations, nos calculs et nos découvertes exposés aux chapitres 9 et 10, ce n'est pas très encourageant. Les planètes et les étoiles, les systèmes solaires, les galaxies et même les trous noirs sont transitoires. La fin de chacun de ces phénomènes est déterminée par une combinaison de processus physiques qui lui est propre. Ces processus, qui vont de la mécanique quantique à la relativité générale, déboucheront en dernière instance sur une brume de particules dérivant dans un cosmos froid et silencieux...

Comment la pensée consciente pourrait-elle s'en sortir dans un univers soumis à une telle transformation ? C'est avec le langage de l'entropie, une fois de plus, que nous pouvons poser et résoudre cette question. En suivant ce fil rouge de l'entropie, nous contemplerons la possibilité ô combien probable que le fait même de penser, quel que soit le genre d'entité qui s'y essaierait dans l'univers, pourrait être un jour entravé par une inéluctable accumulation de déchets. Dans un lointain futur, il est en effet fort possible que tout ce qui tente de penser brûle dans la chaleur engendrée par ses propres idées. La pensée elle-même deviendrait alors physiquement impossible.

Les arguments contre la possibilité que la pensée soit éternelle seront fondés sur des suppositions prudentes et raisonnables.

Nous considérerons tout de même certaines alternatives : des futurs possibles plus hospitaliers à l'égard de la vie et de la vie pensante. Il n'en reste pas moins que la lecture la plus directe des faits suggère que la vie est éphémère. L'intervalle de temps cosmique durant lequel les conditions matérielles permettent l'existence d'êtres conscients d'eux-mêmes est sans aucun doute extrêmement étroit. Si vous feuilletiez en diagonale tout le grand barnum de l'histoire cosmique, vous pourriez facilement passer complètement à côté de l'épisode de la vie. « Une étincelle de lumière entre deux éternités de ténèbres⁶ » : cette description que Nabokov faisait de l'existence humaine s'applique peut-être au phénomène de la vie elle-même.

Nous pleurons notre finitude et nous nous consolons dans une transcendance symbolique, dans ce que nous léguons du simple fait d'avoir participé au voyage. Ni vous ni moi ne serons là dans plusieurs siècles, mais d'autres, oui. Et ce que nous faisons, vous et moi, ce que nous créons puis laissons derrière nous contribue à ce qui sera et à la façon dont la vie future sera vécue. Pourtant, dans un univers où la vie et la conscience disparaîtront finalement, même cet héritage symbolique – ce murmure à l'intention de nos lointains descendants – sera englouti dans le néant.

Nous voilà dans de beaux draps...

Réflexions sur le futur

Nous avons tendance à assimiler les découvertes scientifiques au niveau intellectuel. Lorsque nous apprenons une nouvelle découverte sur le temps, sur les théories unifiées ou sur les trous noirs, l'information nous titille momentanément l'esprit et, si elle est suffisamment impressionnante, y reste gravée. Par son caractère abstrait, la science nous conduit souvent en premier lieu à contempler son contenu d'un point de vue cognitif ; ce n'est qu'ensuite que cette compréhension a quelque chance de nous toucher viscéralement, bien que cela n'arrive que rarement. En certaines occasions cependant, lorsque la science parvient à

convoquer à la fois notre raison et nos émotions, le résultat est très impressionnant.

Laissez-moi vous donner un simple exemple : il y a quelques années, lorsque je commençais à réfléchir aux prédictions sur le futur lointain de l'univers, cette entreprise était essentiellement cérébrale. J'assimilais en effet la documentation pertinente comme une collection des découvertes qui découlent des lois de la nature, fascinantes mais abstraites. Néanmoins, je découvris que, si je m'efforçais *vraiment* de considérer toute vie, toute pensée, toutes les luttes et les réalisations humaines comme des aberrations éphémères, perdues dans une chronologie cosmique par ailleurs stérile, j'assimilais l'information de façon différente. Je pouvais alors la sentir, l'éprouver. La première fois que je m'aventurai sur ce territoire, le voyage me parut fort sombre – je n'ai aucun scrupule à le dire. Des décennies d'étude et de travail scientifiques m'ont souvent procuré des moments d'exaltation et d'émerveillement, mais jamais auparavant un résultat en mathématiques et en physique ne m'avait submergé d'un tel sentiment effrayant de vide.

Avec le temps, mon rapport émotionnel à ces idées s'est affiné. Désormais, la contemplation du futur lointain engendre le plus souvent un sentiment de calme et de connexion avec le monde. C'est alors comme si ma propre identité n'importait plus, comme si elle était absorbée dans un sentiment de gratitude envers le simple fait de faire l'expérience de l'existence – je ne peux le décrire en d'autres termes.

Puisqu'il est plus que probable que vous ne me connaissez pas personnellement, permettez-moi de vous fournir un peu de contexte. Je suis un garçon ouvert d'esprit qui se pique de rigueur. Je viens d'un monde dans lequel vous démontrez que vous avez raison à coup d'équations et de données reproductibles ; un monde dans lequel la validité d'une idée est déterminée par des calculs sans équivoque, et dont les prédictions concordent point par point avec l'expérience, parfois jusqu'à douze chiffres après la virgule. Ainsi, la première fois que j'ai ressenti un de ces moments de sereine plénitude – il se trouve que j'étais alors dans un Starbucks de New York –, j'ai trouvé

cela profondément suspect. Peut-être avait-on versé un lait de soja avarié dans mon Earl Grey. Ou peut-être avais-je perdu la tête.

À la réflexion, j'étais tout à fait sain d'esprit. Nous faisons partie d'une longue lignée d'êtres qui ont soulagé leur malaise existentiel en imaginant qu'ils pourraient laisser une trace durable. Plus l'empreinte laissée est indélébile, et plus il semble que l'existence ait eu de valeur. Selon les mots du philosophe Robert Nozick – mais le réalisateur Frank Capra aurait tout aussi bien pu les mettre dans la bouche du personnage de George Bailey dans *La Vie est belle* – « la mort vous réduit à néant [...] Être ainsi effacé totalement, jusqu'à la moindre trace, contribue fortement à détruire le sens d'une vie⁷ ». C'est pourquoi le désir profond d'atteindre une certaine postérité est susceptible d'imprégner toute la pensée, en particulier chez les gens qui, comme moi, n'ont pas d'orientation religieuse. Mon éducation, ma formation, ma carrière, mes expériences s'en sont toutes trouvées influencées. À chaque étape, je suis allé de l'avant en gardant l'œil rivé sur le long terme, en cherchant à accomplir quelque chose de pérenne. Rien d'étonnant à ce que mes préoccupations professionnelles aient été dominées par l'analyse mathématique de l'espace, du temps et des lois de la nature... Difficile en effet d'imaginer une autre discipline qui puisse concentrer plus directement les pensées quotidiennes sur des questions qui transcendent le moment présent.

Cependant, les découvertes scientifiques elles-mêmes jettent une tout autre lumière sur cette perspective. La vie et l'esprit ne constituent vraisemblablement qu'une minuscule oasis au sein de l'histoire cosmique. Même si l'univers est gouverné par d'élégantes lois mathématiques qui autorisent toutes sortes de processus physiques merveilleux, il ne sera que temporairement l'hôte de la vie et de l'esprit. Si vous méditez cela en profondeur, et si vous vous représentez un futur totalement dépourvu de planètes et d'êtres pensants, votre égard pour l'ère dans laquelle nous vivons peut tendre à la révérence.

Et c'est précisément *cela* que j'avais éprouvé dans ce Starbucks. J'avais cessé de m'accrocher à un avenir fuyant, pour enfin sentir

que je vivais dans un présent transitoire et stupéfiant : telle était l'origine de mon sentiment de calme et de plénitude. Ce changement, dans mon cas, avait été provoqué par la contrepartie cosmologique de l'enseignement procuré au cours des âges par d'innombrables poètes et philosophes, écrivains et artistes, guides spirituels et précepteurs de la pleine conscience – enseignement tout simple, mais subtil, selon lequel la vie se trouve dans l'ici et maintenant. C'est le sens du « Pour toujours – est composé de Mainténants⁸ » de la poétesse Emily Dickinson, ou encore de l'injonction de Thoreau de trouver « ton éternité dans chaque instant⁹ ». Cet état d'esprit est certes difficile à maintenir en permanence. Mon expérience m'indique qu'il se concrétise lorsqu'on s'immerge dans l'étendue complète du temps – des origines jusqu'à la fin. Car cette toile de fond cosmique révèle avec une inégalable clarté à quel point l'ici et maintenant est singulier et fugace.

L'objectif de ce livre est de partager avec vous cette clarté. Nous parcourrons le temps, partant des origines selon les théories les plus actuelles pour nous approcher aussi près de la fin que la science nous le permet. Nous étudierons comment la vie et l'esprit ont émergé du chaos initial, puis nous considérerons les réalisations que sont capables d'élaborer des esprits curieux, passionnés, angoissés, introspectifs, ingénieux et sceptiques, en particulier lorsqu'ils prennent conscience de leur propre mortalité. Nous examinerons, chez nos frères humains, l'ascension de la religion, la pulsion de la création artistique, l'avènement de la science, la quête de vérité et le désir d'éternité. Cette affinité viscérale pour la permanence, que Franz Kafka identifiait comme le besoin de « quelque chose d'indestructible¹⁰ », nous propulsera ensuite vers le lointain futur. Ce faisant, nous évaluerons les perspectives qui s'offrent à tout ce qui nous est cher aujourd'hui, tout ce qui constitue notre réalité, des planètes, étoiles, galaxies et trous noirs jusqu'à la vie et l'esprit.

Ce long chemin mettra en lumière l'esprit de découverte qui anime les êtres humains. Explorateur ambitieux, l'Homme est bien décidé à saisir une réalité immense. Des siècles d'efforts ont déjà éclairé une partie des obscurs territoires de la matière, de

l'esprit et du cosmos. En outre, au cours des prochains millénaires, le cercle des feux de camp ne fera que s'étendre et briller davantage. Jusqu'ici, notre épopée a déjà mis en évidence que la réalité est gouvernée par des lois mathématiques qui sont indifférentes à la morale, aux critères de beauté, au besoin d'amour, au désir de comprendre et à la quête de sens. L'histoire cosmique se déroule de façon froide, implacable et mécanique. Pourtant, à travers le langage et les récits, l'art et la mythologie, la religion et la science, nous avons domestiqué une petite bribe de cette histoire pour qu'elle se fasse l'écho de notre soif de cohérence, de valeur et de sens.

L'apport de l'humanité à l'univers est merveilleux, mais temporaire. Comme il apparaîtra au cours de notre voyage dans le temps, la vie est probablement transitoire, et toute tentative de compréhension née avec elle mourra également avec elle. Rien n'est permanent. Rien n'est absolu. Et ainsi, dans notre quête de sens et de valeur, les seules connaissances pertinentes, les seules réponses sensées ne peuvent être que de notre fait. En fin de compte, alors que nous ne passons qu'un bref instant au soleil, nous sommes tout de même chargés du noble devoir de trouver nous-mêmes notre propre signification.

En route !

2

LA GRAMMAIRE DU TEMPS Le passé, le futur et le changement

Le soir du 28 janvier 1948, entre une interprétation du *Quatuor à cordes n° 13* de Schubert et une émission sur les chansons folkloriques anglaises, la BBC diffusa un débat opposant l'un des plus grands esprits du XX^e siècle, Bertrand Russell, au prêtre jésuite Frederick Copleston ¹. Le sujet ? L'existence de Dieu. Russell, dont les écrits philosophiques novateurs et les principes humanistes lui vaudraient le prix Nobel de littérature en 1950, et dont les idées politiques et sociales iconoclastes lui avaient déjà valu d'être renvoyé de Cambridge et du City College de New York, énuméra une foule d'arguments susceptibles de remettre en cause, voire de rejeter l'existence d'un créateur.

Un argument de Russell en particulier concerne directement notre sujet. « Autant que les preuves scientifiques permettent de l'affirmer », nota-t-il, « l'univers a lentement rampé par étapes pour aboutir à des résultats plutôt pitoyables sur notre Terre, et il va continuer de se traîner à travers une série d'étapes encore plus pitoyables, jusqu'à un état de mort universelle. » Une fois posée cette issue morose, Russell concluait : « Si l'on doit considérer que c'est là la preuve d'une intention, mon avis est qu'il s'agit d'une intention que je ne trouve pas très attirante. Je ne vois par conséquent aucune raison de croire à quelque dieu que ce soit ². » Avant de discuter la question théologique dans un prochain chapitre, je voudrais me concentrer ici sur les preuves scientifiques évoquées par Russell d'une future « mort universelle ». Elles reposent sur une découverte qui remonte au

XIX^e siècle, et dont les racines sont aussi modestes que les conséquences profondes.

Autour de 1850, alors que la révolution industrielle battait son plein, le paysage s'était hérissé d'usines et de fabriques, et la machine à vapeur était devenue la force motrice de la production. Néanmoins, si le passage de la puissance musculaire au travail mécanique avait constitué un bond qualitatif, l'efficacité du moteur à vapeur – c'est-à-dire le travail utile accompli comparé à la quantité de combustible consommée – était faible. Environ 95 % de la chaleur engendrée par la combustion du bois ou du charbon se dissipaient purement et simplement dans l'environnement. Cet écueil poussa une poignée de scientifiques à réfléchir aux principes physiques de la machine à vapeur, afin de trouver le moyen de brûler moins pour obtenir plus. Des décennies de recherches les conduisirent progressivement à un résultat emblématique et à juste titre célèbre : le *second principe de la thermodynamique*.

Exprimé en termes (très) informels, ce principe affirme que la production de déchets est inévitable. Son application universelle, bien au-delà des machines à vapeur – qui furent le catalyseur de sa découverte –, lui confère une importance vitale. Il décrit en effet une propriété fondamentale inhérente à toute matière et à toute énergie, quelles que soient leur forme et leur structure, qu'elles soient animées ou inanimées. Le principe révèle (de nouveau en des termes approximatifs) que tout dans l'univers est dominé par une tendance à s'épuiser, à se dégrader, à s'user irrémédiablement.

Cette formulation familière du principe étant posée, nous voyons où Russell voulait en venir. Le futur nous réserve, semble-t-il, une détérioration continue, une conversion inéluctable de toute l'énergie utile en chaleur inutilisable ; pour ainsi dire, une usure constante des piles qui font marcher la réalité. Cependant, comme nous le verrons plus loin, ce résumé sommaire cache en réalité une progression riche et nuancée, qui est à l'œuvre depuis le Big Bang et qui se poursuivra encore longtemps dans le futur. Cette progression contribue à expliquer notre place au sein de la chronologie cosmique, clarifie la manière dont l'ordre et la

beauté sont susceptibles d'apparaître dans un contexte de dégradation et de déclin généralisés, et nous livre également les moyens potentiels, aussi exotiques paraissent-ils, d'esquiver la fin sinistre envisagée par Russell. Puisque précisément cette science, qui mobilise des concepts tels que l'entropie, l'information et l'énergie, guidera une bonne partie de notre route, cela vaut la peine de s'y attarder un peu pour mieux la comprendre.

Les machines à vapeur

Loin de moi l'idée de suggérer que le sens de la vie est tapi dans les entrailles humides d'une machine à vapeur. Mais, si l'on veut saisir la manière dont l'énergie – quelle qu'elle soit et dans n'importe quel contexte – évolue au cours du temps, il est indispensable de comprendre la façon dont la machine à vapeur exploite la chaleur produite par la combustion du charbon pour animer, par exemple, le mouvement cyclique des pompes d'une installation minière ou d'une roue de locomotive. La façon dont l'énergie évolue a un énorme impact sur l'avenir de la matière, de l'esprit et de toute structure dans l'univers. Quittons donc les nobles contrées de la vie, de la mort, du sens et de la finalité pour un terrain plus prosaïque : allons à la rencontre d'une machine à vapeur du XVIII^e siècle, dans le vacarme incessant de ses cliquetis et de son halètement.

Son principe de fonctionnement est astucieux, mais les bases scientifiques sont simples : la vapeur d'eau a tendance à se dilater lorsqu'on la chauffe, de sorte qu'elle exerce une pression vers l'extérieur. La machine à vapeur tire profit de ce phénomène : on chauffe un réservoir cylindrique rempli de vapeur d'eau, et fermé par un piston étroitement ajusté qui glisse librement dans un sens ou un autre contre les parois. La vapeur chauffée vient ainsi appuyer avec force contre le piston, qu'elle repousse. Ce travail mécanique permet alors de faire tourner une roue, d'entraîner un moulin ou encore d'actionner un métier à tisser, selon l'application visée. Ensuite, une fois qu'elle a dépensé son énergie par le biais de cet effort, la vapeur refroidit, et le piston

recule jusqu'à sa position antérieure, prêt à être repoussé derechef lorsque la vapeur sera à nouveau chauffée – un cycle qui se poursuivra tant qu'il y aura du combustible à brûler pour réchauffer ladite vapeur³.

Si l'histoire retient le rôle central du moteur à vapeur dans la révolution industrielle, les questions qu'il souleva furent tout aussi cruciales pour la science fondamentale. Comment décrire le fonctionnement de la machine à vapeur d'une façon mathématiquement rigoureuse ? Y a-t-il une limite à l'efficacité de la conversion de la chaleur en travail utile ? Certains aspects des opérations fondamentales de la machine à vapeur sont-ils indépendants des détails de sa conception mécanique et des matériaux utilisés, et relèvent-ils ainsi de principes physiques universels ?

C'est en démêlant ces questions que le physicien français et ingénieur militaire Sadi Carnot fonda le domaine de la thermodynamique – la science de la chaleur, de l'énergie et du travail. Et ce, malgré les maigres ventes de son traité de 1824, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*⁴. Bien qu'elles aient mis du temps à s'imposer, ses idées inspireront aux scientifiques, au cours du siècle suivant, une vision radicalement nouvelle de la physique.

Le point de vue statistique

Selon le point de vue scientifique classique, hérité d'Isaac Newton sous forme mathématique, les lois de la physique formulent des prédictions inébranlables quant au mouvement des corps. Donnez-moi la position et la vitesse d'un objet à un moment donné, dites-moi les forces qui agissent dessus : les équations de Newton feront le reste et prédiront la trajectoire de l'objet. Qu'il s'agisse de la Lune attirée par la gravité terrestre ou de la balle de baseball que vous venez de frapper vers le centre du terrain, l'observation a confirmé que ces prédictions sont vérifiées avec précision.

Mais il y a un truc. Si vous avez fait de la physique au lycée, vous vous rappelez peut-être que, lorsqu'on analyse les trajectoires d'objets macroscopiques, on applique en général, quoique sans se poser trop de questions, un grand nombre d'hypothèses simplificatrices. Dans le cas de la Lune comme de la balle de baseball, on ignore leur structure interne et on les modélise par de simples particules massives. C'est une approximation plutôt grossière. Même un grain de sel contient un milliard de milliards d'atomes et c'est juste... eh bien, un grain de sel. Pourtant, lorsqu'on considère le mouvement de la Lune sur son orbite, on néglige la trajectoire saccadée de telle ou telle molécule perdue dans les plaines poussiéreuses de la mer de la Tranquillité. Quant à la balle de baseball sur sa trajectoire en cloche, on ne fait aucun cas des vibrations qui animent telle ou telle molécule dans son noyau de liège. On ne s'intéresse en réalité qu'au mouvement d'ensemble de la Lune ou de la balle. Et, dans ce cas, appliquer les lois de Newton à des modèles simplifiés fait tout à fait l'affaire⁵.

Ces succès permettent de comprendre le défi qu'affrontaient les physiciens du XIX^e siècle lorsqu'ils s'attaquèrent au problème des machines à vapeur. La vapeur brûlante qui exerce une pression contre le piston du moteur rassemble un nombre gigantesque de molécules d'eau, peut-être un million de milliards de milliards. Nous ne pouvons plus négliger cette structure interne comme nous le faisons lorsque nous analysons les trajectoires de la Lune et de la balle de baseball, parce que le mouvement de ces particules – qui se cognent contre le piston, rebondissent sur sa surface, frappent la paroi du réservoir, repartent à nouveau vers le piston – est précisément au cœur du fonctionnement de la machine.

Le problème est le suivant : personne, aussi malin soit-il, et aussi formidables soient les supercalculateurs qu'il utilise, ne peut calculer l'ensemble des trajectoires suivies par un aussi gigantesque nombre de molécules d'eau. Sommes-nous coincés pour autant ?

Vous pourriez le penser. Mais il se trouve qu'un changement de point de vue s'apprête à nous sauver. Les grands nombres

produisent parfois leurs propres simplifications, et elles sont très puissantes. Il est certainement difficile, et en fait impossible, de prévoir l'instant de votre prochain éternuement. Pourtant, si nous élargissons notre point de vue et englobons le très grand nombre d'êtres humains que constitue la population mondiale, nous pouvons prédire qu'au cours de la prochaine seconde, environ quatre-vingt mille éternuements auront lieu sur Terre⁶ ! Retenons ceci : en adoptant un point de vue statistique, l'immense population humaine mondiale devient la clé du pouvoir prédictif au lieu d'en être un obstacle. Le comportement des grands groupes exhibe souvent des régularités statistiques pourtant absentes au niveau des individus.

Les physiciens James Clerk Maxwell, Rudolf Clausius, Ludwig Boltzmann et nombre de leurs collègues furent les pionniers d'une approche similaire concernant les atomes et les molécules. Pour eux, il fallait abandonner l'étude détaillée des trajectoires individuelles en faveur de descriptions statistiques du comportement moyen de grandes populations de particules. Ils montrèrent non seulement que c'était là un moyen de rendre faisables les calculs, mais que, de surcroît, les propriétés qui peuvent être quantifiées de cette façon sont justement celles qui comptent le plus. Par exemple, le chemin précis suivi par telle ou telle molécule d'eau n'affecte en rien ou presque la pression subie par le piston de la machine à vapeur. Cette pression émerge bien plutôt du mouvement moyen des millions de milliards de milliards de molécules qui frappent sa surface à chaque seconde. Voilà ce qui compte. Et c'est précisément ce que cette nouvelle approche statistique permettait aux scientifiques de calculer.

Nous vivons désormais à l'ère des sondages électoraux, de la génétique des populations et plus généralement du « big data », de sorte que l'adoption d'un cadre statistique par les physiciens ne vous semble sans doute guère novatrice. Nous nous sommes habitués au pouvoir prédictif des éclairages statistiques extraits de l'étude de grands groupes. C'est oublier qu'au XIX^e siècle et au début du XX^e, le raisonnement statistique était en rupture avec la précision rigide qu'on avait fini par identifier à la physique elle-même. Gardez également à l'esprit que, jusqu'aux

toutes premières années du XX^e siècle, certains scientifiques très respectés remettaient encore en cause l'existence des atomes et des molécules, c'est-à-dire les fondements mêmes de l'approche statistique.

Malgré quelques récalcitrants, le raisonnement statistique n'allait pas tarder à démontrer sa valeur. En 1905, Albert Einstein lui-même expliqua quantitativement le mouvement tremblotant de grains de pollen en suspension dans un verre d'eau en faisant l'hypothèse qu'ils étaient continuellement bombardés par des molécules... Devant un tel succès, il fallait sacrément aimer aller à contre-courant pour continuer à douter de l'existence des molécules. En outre, une avalanche croissante de publications scientifiques aussi bien théoriques qu'expérimentales montraient que les conclusions obtenues *via* l'analyse statistique d'un grand nombre de particules – comment elles rebondissent à l'intérieur d'un réservoir et par conséquent exercent une pression sur telle surface, ou acquièrent telle densité, ou s'établissent à telle température – concordaient si parfaitement avec les données expérimentales que le pouvoir explicatif de cette approche ne laissait tout simplement plus de place au doute. Ainsi naquit le fondement statistique des processus thermiques.

Ce beau succès a permis aux physiciens de comprendre non seulement les machines à vapeur, mais aussi un grand nombre de systèmes thermodynamiques – de l'atmosphère de la Terre à la couronne solaire, en passant par le nombre colossal de particules qui grouillent dans une étoile à neutron. Mais quel rapport avec la vision du futur proposée par Russell ? Quel rapport avec le pronostic d'un univers rampant progressivement jusqu'à la mort ? Bonnes questions. Accrochez-vous : on y arrive, mais il nous faut encore gravir quelques marches. L'étape suivante consiste à se servir de ces avancées pour expliquer une propriété quintessentielle du futur : il est profondément différent du passé.

De ceci en cela

Les êtres humains font l'expérience de la distinction entre le passé et le futur ; pour nous, cette distinction est à la fois évidente et fondamentale. Nous sommes nés dans le passé. Nous mourrons dans le futur. Entre les deux, nous sommes témoins d'innombrables événements qui paraîtraient absurdes s'ils se manifestaient dans l'ordre inverse. Van Gogh a peint les couleurs tourbillonnantes de *La Nuit étoilée*, mais il ne pouvait pas les ôter du tableau à coups de pinceau inversés pour retrouver une toile vierge. Le *Titanic* a déchiré sa coque en ripant contre un iceberg, mais le paquebot ne pouvait pas faire marche arrière pour refermer la plaie. Chacun de nous grandit et vieillit, mais personne ne peut faire tourner à l'envers les aiguilles de son horloge interne et retrouver sa jeunesse.

Puisque l'irréversibilité se niche au cœur de ces processus, vous seriez en droit de penser qu'il est facile d'identifier son origine mathématique dans les lois de la physique. Au sein des équations, on devrait certainement pouvoir mettre le doigt sur un terme précis capable d'assurer que, si les choses peuvent se transformer de *ceci en cela*, les maths leur interdisent de se transformer de *cela en ceci*. Et pourtant, les équations que nous avons développées depuis des siècles ne nous ont rien offert de tel.

Bien au contraire, tandis que les lois de la physique étaient sans cesse précisées, passant entre les mains de Newton (pour la mécanique classique), de Maxwell (pour l'électromagnétisme), d'Einstein (pour la physique relativiste) et de dizaines de scientifiques responsables de la physique quantique, une de leurs caractéristiques a tenu bon : l'indifférence totale de ces lois à l'égard de ce que nous, les humains, appelons le futur et le passé. Étant donné l'état du monde au moment présent, les équations mathématiques traitent l'évolution des événements vers le futur et son symétrique vers le passé exactement de la même manière. Si cette distinction nous importe profondément, les lois, quant à elles, haussent les épaules et affirment que cela ne fait pas plus de différence que de décider si les horloges d'un stade doivent indiquer le temps écoulé ou le temps restant. Autrement dit, si les

lois de la nature autorisent qu'une séquence particulière d'événements ait lieu, alors elles autorisent aussi nécessairement la séquence en sens inverse⁷.

Lorsque je l'ai appris au cours de mes études, cela me parut friser le ridicule. Dans la vraie vie, nous ne voyons pas les nageurs olympiques bondir hors des piscines les pieds en premier pour atterrir proprement sur les plongeurs. Nous ne voyons pas des éclats de verre bondir du sol pour constituer une lampe Tiffany. Les séquences de films projetées à l'envers nous amusent précisément parce qu'elles montrent des choses totalement contraires à notre expérience. Et pourtant, les maths nous disent que les événements décrits par ces séquences à rebours sont en parfait accord avec les lois de la physique.

Mais alors, pourquoi notre expérience est-elle si déséquilibrée ? Pourquoi voyons-nous seulement des événements qui se déroulent dans une direction temporelle, et jamais à l'envers ? Une partie essentielle de la réponse est contenue dans la notion d'*entropie* que nous avons déjà évoquée.

L'entropie : un tour de chauffe

L'entropie fait partie des concepts les plus subtils et déconcertants de la physique fondamentale, ce qui n'empêche pas les gens de l'évoquer à tort et à travers pour décrire des situations quotidiennes où les choses passent de l'ordre au chaos, ou plus simplement de bonnes à mauvaises. Tant qu'il s'agit d'une forme d'expression familière, tout va bien ; il m'arrive aussi de parler de l'entropie de cette façon. Mais, puisque c'est la conception scientifique de l'entropie qui doit guider notre voyage – et qui se trouve au cœur de la sombre vision du futur évoquée par Russell –, penchons-nous sur son véritable sens.

Commençons par une analogie. Imaginez que vous secouiez vigoureusement un sac contenant cent pièces de monnaie identiques, puis que vous les renversiez sur la table de votre salle à manger. S'il apparaissait que toutes les pièces sont tombées côté « face », vous seriez surpris. Mais pourquoi ? La réponse paraît

évidente, mais cela vaut la peine d'y réfléchir. L'absence du moindre « pile » signifie que chacune des cent pièces cognée, bousculée, tournant au hasard dans sa chute doit avoir touché la table avec son côté « face » tourné vers le haut. Absolument toutes les pièces. Cela paraît difficile. C'est beaucoup demander d'espérer un tel résultat. Par comparaison, si nous considérons un résultat à peine différent où, mettons, nous avons une seule pièce qui indique « pile » (et toujours « face » pour les 99 autres), il peut se produire de cent façons différentes : l'unique « pile » solitaire pourrait être la première pièce, ou ce pourrait être la deuxième, ou la troisième et ainsi de suite jusqu'à la pièce numéro 100. Obtenir 99 faces est donc cent fois plus facile – c'est-à-dire cent fois plus probable – que de n'obtenir que des faces.

Poursuivons l'analogie. Un raisonnement rapide révèle qu'il y a 4 950 façons différentes d'obtenir deux « pile » (la première pièce et la deuxième donnent « pile », ou alors la première et la troisième, ou la deuxième et la troisième, la première et la quatrième, et ainsi de suite). Un petit calcul supplémentaire, et l'on découvre qu'il existe 161 700 manières différentes d'obtenir trois « pile », presque 4 millions pour quatre « pile », et environ 75 millions pour cinq. Les chiffres exacts importent peu ; c'est la tendance générale que je veux vous faire sentir. Chaque « pile » supplémentaire fait que le nombre d'événements qui donnent le bon résultat est bien plus grand. Spectaculairement plus grand. Les nombres atteignent un maximum pour 50 « pile » (et donc 50 « face ») : pour ce résultat, il y a environ cent milliards de milliards de milliards de combinaisons possibles (allez, 100 891 344 545 564 193 334 812 497 256 combinaisons si on veut être précis⁸). Obtenir autant de « face » que de « pile » est par conséquent cent milliards de milliards de milliards de fois plus probable que de n'obtenir que des « face ».

C'est pour ça que n'obtenir que des « face » vous aurait beaucoup surpris.

Mon explication repose sur le fait que la plupart d'entre nous considérons intuitivement la collection de pièces un peu comme Maxwell et Boltzmann le faisaient pour les molécules de gaz

dans un récipient. De même que les scientifiques renoncèrent à analyser la vapeur molécule par molécule, nous n'évaluons pas un tas de pièces de monnaie une par une. Nous nous moquons bien de savoir – et nous ne remarquons même pas – si la 29^e pièce est côté « face » et la 71^e côté « pile ». Nous considérons plutôt le tas dans son ensemble. Seul attire notre attention le nombre total de « face », comparé au nombre de « pile » : y a-t-il plus de « face » que de « pile » ou plus de « pile » que de « face » ? Deux fois plus ? Trois fois plus ? Grosso modo autant ? Bien que nous soyons capables de déceler des changements significatifs dans le ratio des « pile » et « face », nous discernons difficilement les réarrangements aléatoires qui conservent ce ratio – par exemple, un passage des 23^e, 46^e et 92^e pièces de « pile » à « face » en même temps qu'un passage des 17^e, 52^e et 81^e pièces de « face » à « pile ».

En conséquence, j'ai réparti les différents résultats possibles en groupes, contenant chacun des configurations de pièces qui se ressemblent, et j'ai énuméré les effectifs de chaque groupe : j'ai alors compté le nombre de résultats sans « pile », le nombre de résultats avec un seul « pile », le nombre de résultats avec deux « pile » et ainsi de suite jusqu'au nombre de résultats avec 50 « pile ».

Il est important de noter que ces groupes n'ont pas des effectifs égaux, loin de là. Ces écarts d'effectif mettent en évidence les raisons pour lesquelles vous devriez être choqué en constatant que vos pièces renversées ne vous ont donné aucun « pile » (un groupe qui contient exactement un membre), légèrement moins choqué si vous obtenez un « pile » (un groupe de 100 membres), encore un tantinet moins si vous en obtenez deux (un groupe de 4 950 membres) et complètement blasé si le déversement de pièces produit une configuration où le nombre de « face » et le nombre de « pile » sont égaux (un groupe qui contient à peu près cent milliards de milliards de milliards de membres). En somme, plus l'effectif d'un groupe est élevé, plus il est probable qu'un résultat aléatoire appartienne à ce groupe. Quand il s'agit de groupes, la taille compte.

Si tout cela est nouveau pour vous, il est possible que vous n'ayez pas compris que nous venons d'illustrer l'essence du concept d'entropie. L'entropie d'une configuration donnée de pièces de monnaie correspond à la taille de son groupe – c'est-à-dire le nombre de configurations parmi celles qui lui ressemblent furieusement⁹. S'il en existe beaucoup de semblables, la configuration donnée a une entropie élevée. Si, au contraire, ces configurations semblables sont rares, la configuration donnée a une entropie basse. Toutes choses égales par ailleurs, un déversement aléatoire de pièces a plus de chance de faire partie d'un groupe d'entropie élevée, puisque ce sont ces groupes-là qui ont le plus de membres.

Cette formulation s'applique aussi aux usages familiers du terme d'entropie que j'ai mentionnés au début de cette section. Intuitivement, les configurations désordonnées (pensez à un bureau mal rangé où s'empilent divers documents, crayons et trombones) ont une entropie élevée, parce qu'il existe de très nombreuses façons de réarranger une configuration désordonnée de sorte qu'elle continue à avoir l'air tout aussi désordonnée. Les configurations ordonnées (pensez cette fois à un bureau impeccable où tous les documents, crayons et trombones sont soigneusement disposés à leur place) ont une entropie basse, parce qu'il existe peu de réarrangements qui auront l'air aussi bien rangés. Comme dans le cas des pièces de monnaie, l'entropie élevée sort du lot, parce qu'il existe bien davantage d'arrangements désordonnés que d'arrangements ordonnés.

L'entropie : on y va pour de bon

L'exemple des pièces de monnaie est utile, dans la mesure où il illustre l'approche choisie par les scientifiques pour traiter les abondants effectifs de particules qui constituent habituellement les systèmes physiques – aussi bien les molécules d'eau qui voltigent dans tous les sens dans une machine à vapeur brûlante que les molécules de l'air à la dérive dans votre maison. Exactement comme avec les pièces, nous choisissons d'ignorer les détails de

ce qui arrive aux particules individuelles ; autrement dit, qu'une molécule d'eau ou de l'air se trouve ici ou là est sans conséquence. Tout au contraire, nous rassemblons dans le même groupe les configurations de particules sensiblement identiques. Dans le cas des pièces, le critère de ressemblance était le ratio de « face » et de « pile » : on ne se soucie pas de la position exacte de telle ou telle pièce, et on ne remarque que l'apparence générale de chaque configuration. Mais, dans le cas d'un très grand nombre de molécules de gaz, que signifie « sensiblement identiques » ?

Pensez à l'air qui emplit la pièce où vous vous trouvez actuellement. Si vous êtes comme moi ou comme le reste de l'humanité, vous vous moquez éperdument de savoir si telle molécule d'oxygène dérive vers la fenêtre ou si telle autre molécule d'azote rebondit sur le sol. Tout ce qui vous importe, c'est qu'à chaque fois que vous inspirez, le volume d'air inhalé satisfasse vos besoins. Bon : il y a en fait deux autres caractéristiques qui vous importent. Vous seriez malheureux si la température de l'air était chaude au point de vous brûler les poumons, ou si la pression de l'air était si élevée qu'elle crève vos tympanes (parce que vous ne l'aviez pas équilibrée avec l'air déjà présent dans vos trompes d'Eustache). En somme, ce qui vous importe, c'est le volume, la pression et la température de l'air. Eh bien, il se trouve que ce sont les quantités macroscopiques qui, depuis Maxwell et Boltzmann, intéressent les physiciens.

Par conséquent, quand nous parlerons d'un très grand nombre de molécules dans un récipient, nous dirons que différentes configurations sont « sensiblement identiques » si elles occupent le même volume, ont la même température et exercent la même pression. Comme dans notre analogie, on regroupe ensemble toutes les configurations semblables, et on dit que chaque membre du groupe donne lieu au même *état macroscopique*. L'entropie de l'état macroscopique est le nombre de ces configurations qui se ressemblent. À supposer que, dans la pièce où vous vous trouvez, vous ne soyez pas en ce moment même en train de brancher un chauffage d'appoint (qui modifie la température), de monter une cloison étanche (qui diminue le volume)

ou d'injecter un supplément d'oxygène (qui change la pression), les configurations de molécules de l'air qui voltigent de-ci de-là changent certes en permanence, mais appartiennent toutes au même groupe. En d'autres termes, elles se ressemblent toutes énormément, puisqu'elles produisent toutes exactement les propriétés macroscopiques dont vous êtes en train de faire l'expérience.

L'organisation des particules en groupes de configurations semblables nous offre un schéma extraordinairement puissant. On l'a vu, les pièces de monnaie lancées au hasard ont plus de chances d'appartenir aux groupes où il y a le plus de membres (c'est-à-dire où l'entropie est élevée). Les molécules rebondissant au hasard obéissent à une règle identique. L'idée est aussi simple que ses implications sont profondes. Où que se trouvent ces particules qui rebondissent – dans une machine à vapeur, dans votre chambre ou n'importe où ailleurs –, il suffit de connaître les caractéristiques générales des configurations les plus fréquentes (celles qui appartiennent aux groupes ayant les effectifs les plus élevés) pour prédire les propriétés macroscopiques du système. Il est vrai, ce ne sont que des prédictions statistiques, mais la probabilité qu'elles soient exactes est extraordinairement élevée. Et le plus beau, c'est que l'on s'est affranchi de l'analyse complexe – et insurmontable – des trajectoires d'un nombre ridiculement grand de particules.

Pour mettre en œuvre ce programme, il nous faut donc aiguïser notre capacité à distinguer les configurations de particules fréquentes (entropie élevée) de celles qui sont rares (entropie basse). Autrement dit, étant donné l'état d'un système physique, il nous faut déterminer s'il existe ou non un grand nombre de réarrangements de ses constituants qui le laissent virtuellement inchangé.

Reprenons nos études de cas, et rendons-nous dans votre salle de bains dont l'air s'est chargé de vapeur d'eau après que vous y avez pris une longue douche brûlante. Pour déterminer l'entropie de la vapeur, nous devons compter le nombre de configurations des molécules – leurs positions et leurs vitesses possibles – présentant toutes les mêmes propriétés macroscopiques, c'est-à-dire

qui ont le même volume, la même température et la même pression¹⁰. Comptabiliser ainsi une collection de molécules de H_2O est un travail assurément plus exigeant que ne l'était le décompte de quelques pièces de monnaie, mais c'est une affaire que les étudiants spécialisés en physique maîtrisent dès leur deuxième année post-bac. Il est plus direct – et plus éclairant aussi – de déterminer la façon dont le volume, la température et la pression affectent qualitativement l'entropie.

Commençons par le volume. Imaginez que les molécules de H_2O à la dérive se trouvent toutes concentrées en une pelote dense dans un coin de votre salle de bains. Dans cette configuration, les réarrangements possibles des positions des molécules sont limités : vous ne pouvez déplacer les molécules de H_2O qu'à l'intérieur de la pelote, ou sinon la nouvelle configuration aura *bel et bien* l'air différente. Au contraire, lorsque la vapeur est uniformément répartie dans tout le volume de la salle de bains, le jeu de chaises musicales moléculaire est considérablement moins contraint. Vous pouvez échanger les positions de molécules proches du lavabo avec celles de molécules qui flottent près de l'applique, celles près du rideau de douche avec celles en suspension près de la fenêtre ; et néanmoins, dans l'ensemble, la vapeur aura exactement la même allure. Notez également que plus votre salle de bains est grande, plus vous disposez d'endroits différents où saupoudrer vos molécules – cela augmente aussi le nombre de réarrangements possibles. La conclusion est donc que les configurations de molécules les moins volumineuses et les plus densément agglutinées ont une entropie basse, tandis que les configurations plus grandes et plus uniformes ont une entropie plus élevée.

Passons maintenant à la température. Au niveau moléculaire, qu'entend-on par température ? La réponse est bien connue : la température est la vitesse moyenne d'agitation des molécules dans l'ensemble qu'elles constituent¹¹. Un objet est froid lorsque l'agitation de ses molécules est lente, et chaud lorsqu'elle est frénétique. Ainsi, déterminer la manière dont la température affecte l'entropie revient à déterminer comment celle-ci se trouve affectée par la vitesse moléculaire moyenne. Et, tout comme dans le

cas des positions moléculaires, il n'est pas difficile d'en avoir une estimation qualitative.

Plus la température de la vapeur est basse, moins les réarrangements des vitesses autorisés sont nombreux : pour vous assurer que la température reste fixe – et ainsi garantir que les configurations obtenues sont sensiblement identiques –, il vous faut compenser toute augmentation des vitesses de certaines molécules par une diminution adéquate des vitesses des autres. Une température basse (une vitesse moléculaire moyenne faible) impose une contrainte : la marge au-dessus du plancher indépassable, zéro, n'est pas très grande. Vous n'avez accès qu'à une gamme étroite de vitesses moléculaires possibles, et par conséquent votre marge de manœuvre pour réarranger lesdites vitesses est limitée.

Au contraire, si la température est élevée, votre jeu de chaises musicales est encore une fois amplifié : si la moyenne est plus élevée, la gamme des vitesses moléculaires – certaines plus grandes, d'autres plus petites que la moyenne – est élargie, ce qui vous donne plus de latitude pour mélanger les vitesses tout en préservant la moyenne. Puisqu'il y a plus de réarrangements des vitesses moléculaires qui se ressemblent énormément, cela signifie qu'une température plus élevée implique généralement une entropie plus haute.

Terminons par la pression. La pression exercée par la vapeur sur votre peau ou sur les murs de la salle de bains est due aux impacts des molécules d'eau qui frappent ces surfaces. Puisque chaque impact exerce une minuscule poussée, plus le nombre de molécules est grand, plus forte est la pression. Pour une température et un volume donnés, la pression est donc déterminée par le nombre total de molécules de vapeur dans votre salle de bains, une quantité dont les conséquences sur l'entropie ne posent pas de difficulté. Moins de molécules d'eau dans votre salle de bains (vous avez pris une douche plus courte) signifie moins de réarrangements possibles (donc une basse entropie) ; plus de molécules (votre douche a été plus longue) signifie plus de réarrangements, et donc une entropie plus élevée.

Résumons. Une moindre quantité de molécules, ou une température plus basse, ou un volume plus petit, aboutissent à une entropie plus basse. Au contraire, lorsqu'on a plus de molécules, ou une température plus élevée ou un volume plus grand, l'entropie est plus grande.

Permettez que, à partir de ce résumé, je souligne une façon de voir l'entropie – un point de vue qui manque de précision, mais qui constitue une bonne règle empirique. On doit s'attendre à rencontrer des états d'entropie élevée. Puisque ces états peuvent être réalisés par une très grande variété de réarrangements des particules constitutives, ils sont typiques, banals, faciles à obtenir, abondants. En revanche, si vous rencontrez un état de faible entropie, vous devriez y regarder de plus près. Une entropie faible signifie en effet qu'il y a beaucoup, beaucoup moins de façons de réaliser cet état macroscopique en réarrangeant ses ingrédients microscopiques, et par conséquent de telles configurations sont peu probables, inhabituelles et rares ; elles sont finement ajustées.

Vous sortez d'une longue douche chaude et voici la vapeur uniformément répartie dans la salle de bains : l'entropie est élevée et la situation n'est en rien surprenante. Maintenant, sortez de la même douche et constatez que toute la vapeur se concentre en un petit cube flottant devant le miroir : l'entropie est faible, et c'est extraordinairement inhabituel. En fait, c'est même tellement inhabituel que, si vous vous trouviez en pratique devant une telle configuration, les explications que vous avez l'habitude d'invoquer lorsque vous êtes occasionnellement témoin d'un événement improbable devraient dans ce cas vous laisser fort sceptique. Une telle explication *pourrait* être la bonne. Mais ce n'est pas le cas, j'en mettrais ma tête à couper. Si cent pièces de monnaie tombaient côté « face » sur la table de votre salle à manger, vous suspecteriez que ce n'est pas un simple coup de chance et qu'il y a une raison autre que le hasard (par exemple : quelqu'un a retourné tous les côtés « pile » quand vous aviez le dos tourné). De la même façon, à chaque fois que vous rencontrez des configurations de faible entropie, vous devriez chercher une explication qui dépasse la simple coïncidence.

Ce même raisonnement s'applique à des événements en apparence aussi banals que le fait de se retrouver nez à nez avec un œuf, une fourmilière ou une tasse. Le caractère ordonné, élaboré de ces configurations de basse entropie requiert en effet une explication. Il est certes concevable, mais très improbable et fantaisiste, que le mouvement aléatoire de particules toutes exactement du bon type puisse avoir, par un coup de chance, provoqué leur coalescence afin de former un œuf, une fourmilière ou une tasse. Mais nous devrions plutôt solliciter d'autres explications plus convaincantes et, bien sûr, nous n'avons pas à chercher bien loin : l'œuf, la fourmilière et la tasse proviennent tous trois d'une forme de vie particulière qui manipule dans son environnement des configurations de particules par ailleurs aléatoires, afin de constituer des structures ordonnées. Nous verrons au cours des prochains chapitres comment la vie est capable de produire un ordre aussi délicat.

Pour l'heure, reprenez ceci : les configurations de basse entropie devraient être considérées comme un symptôme, ou un indice, du fait que de puissantes forces organisatrices sont peut-être responsables de l'ordre que nous rencontrons.

À la fin du XIX^e siècle, fort de ces acquis théoriques – auxquels il contribua lui-même largement –, le physicien autrichien Ludwig Boltzmann crut qu'il pourrait résoudre le problème qui nous a servi à lancer la discussion dans cette section : qu'est-ce qui distingue le futur du passé ? Sa réponse s'appuya sur une caractéristique de l'entropie qui est contenue dans le second principe de la thermodynamique.

Les lois de la thermodynamique

Alors que l'entropie fait l'objet d'un grand nombre de références culturelles, on observe nettement moins de hochements de tête dans le public quand on évoque le premier principe de la thermodynamique. Pourtant, pour bien comprendre le second principe, il est bon de commencer par le premier ! En fait, ce premier principe est lui aussi largement connu, mais sous un

pseudonyme : la loi de conservation de l'énergie. Elle établit que, quelle que soit la quantité d'énergie que vous avez au commencement d'un processus, vous en aurez la même quantité à la fin. Bien sûr, il vous faut être péniblement exhaustif dans votre comptabilité de l'énergie, et prendre en considération toutes les formes en lesquelles l'énergie initiale a pu se convertir – telle l'énergie cinétique (l'énergie de mouvement), l'énergie potentielle (de l'énergie stockée, comme dans un ressort étiré), le rayonnement (l'énergie transportée par des champs comme le champ électromagnétique) ou la chaleur (le mouvement d'agitation aléatoire des molécules ou des atomes). Si vous tenez compte de tout, le premier principe de la thermodynamique assure que le bilan comptable de l'énergie sera parfaitement équilibré¹².

Le second principe de la thermodynamique, quant à lui, se concentre sur l'entropie. Contrairement au premier principe, le second n'est pas une loi de conservation, mais de croissance. Il affirme que l'entropie a une irrésistible propension à augmenter au cours du temps. En termes familiers, les configurations exceptionnelles ont tendance à évoluer vers des configurations banales (votre chemise soigneusement repassée se froisse et fait des plis), ou encore : l'ordre tend à déchoir en désordre (votre garage bien rangé devient un capharnaüm confus d'outils, de cartons et de machins sportifs). Toutefois, si cette description fournit une image intuitive correcte, l'interprétation statistique de l'entropie proposée par Boltzmann permet de formuler le second principe avec précision et, ce qui est tout aussi important, de comprendre pourquoi il doit être vrai.

En dernière analyse, tout se réduit à un jeu de nombres. Revenons à nos pièces de monnaie. Disposez-les soigneusement sur une table de manière qu'elles soient toutes côté « face » – une configuration dont l'entropie est basse –, puis secouez-les : vous vous attendez à obtenir au moins quelques côtés « pile » – une configuration d'entropie plus élevée. Brassez-les davantage : il est concevable que vous reveniez à la configuration où il n'y a que des « face », mais cela exigerait que tous les basculements aient été précisément les bons, de sorte que les seules pièces qui se