

LUMIÈRE  
DANS L'OBSCURITÉ



HEINO FALCKE

en collaboration avec Jörg Römer

---

LUMIÈRE  
DANS L'OBSCURITÉ

Les trous noirs, l'univers et nous

*Traduit de l'allemand  
par Corinna Gepner*

BUCHET • CHASTEL

*La traductrice remercie Raphaël Chevrier  
pour sa relecture et Mathieu Langer.*

Titre original :  
*Licht im Dunkeln*

Première édition :  
© 2020, Klett-Cotta – J. G. Cotta'sche Buchhandlung  
Nachfolger GmbH, Stuttgart  
© Heino Falcke, Jörg Römer

Et pour la traduction française,  
publiée sur accord de Michael Gaeb et Books And More Paris :  
© Buchet/Chastel, Libella, Paris, 2022  
ISBN 978-2-283-03476-7

## PROLOGUE

Et pourtant on la voit

Soudain, l'obscurité se fait dans la grande salle de presse de la Commission européenne à Bruxelles. Voilà enfin le moment tant attendu pour lequel nous avons tous travaillé de nombreuses années jusqu'à l'épuisement. Nous sommes le 10 avril 2019, il est 15 heures, 6 minutes et 20 secondes. Dans 40 secondes, le monde pourra pour la première fois admirer l'image d'un gigantesque trou noir. Celui-ci se trouve à 55 millions d'années-lumière de la Terre, au centre de la galaxie Messier 87, dite M87. On a longtemps cru que les ténèbres des trous noirs resteraient à tout jamais cachées à nos yeux. Mais aujourd'hui, elles vont enfin apparaître sous les feux des projecteurs.

La conférence de presse a commencé, mais nous n'en soupçonnons encore nullement les répercussions. Mille ans d'exploration humaine jusqu'aux limites de nos connaissances, des théories révolutionnaires sur l'espace et le temps, des technologies de pointe, le travail d'une jeune génération de radioastronomes et toute

ma vie de chercheur convergeront aujourd'hui dans l'image de ce trou noir. Des astronomes, des scientifiques, des journalistes et des hommes politiques suivent avec fascination ce que nous allons montrer, ici et dans d'autres capitales du monde. J'apprendrai plus tard que des millions de gens du monde entier patientent devant leur écran et que, dans quelques heures seulement, près de quatre milliards de personnes verront notre IMAGE.

Au premier rang sont assis des collègues émérites et de jeunes scientifiques, parmi lesquels se trouvent beaucoup de mes étudiants. Nous avons derrière nous des années de travail intense, au cours desquelles ils sont allés au-delà d'eux-mêmes et de moi. Bon nombre d'entre eux se sont rendus à cet effet dans les régions du monde les plus reculées, parfois au péril de leur vie. Et en ce jour, le résultat de leur travail, leur réussite, est présenté au public tandis qu'eux-mêmes sont assis dans le noir. Je voudrais remercier chacun et chacune d'entre eux, car ce sont eux qui ont rendu possible cette avancée majeure.

Le moment approche. Je me trouve dans un tunnel, les impressions défilent à toute allure tel le vent aux oreilles d'un pilote de course. Je ne remarque pas le téléphone portable braqué sur moi au troisième rang. La vidéo sera postée plus tard sur un des sites pour enfants les plus populaires sous la rubrique « Sujets tendance » – entre des blagues vulgaires sur le postérieur du président américain et le joint d'un rappeur connu. La tension des journalistes me gagne : les regards trahissent l'attente.

Mon cœur bat à tout rompre. Tout le monde a les yeux rivés sur moi.

J'ai été précédé à la tribune par Carlos Moedas, le commissaire européen à la Recherche, qui a attisé la curiosité du public. « Ne soyez pas trop long », lui avions-nous martelé. Du coup il a été trop bref, m'obligeant à meubler au débotté en m'efforçant de dissimuler ma nervosité.

La toute première image sera montrée en simultané dans le monde entier. Elle s'affichera sur le gigantesque écran bruxellois à 15 heures 07 précises, heure d'Europe centrale. Mes collègues à Washington, Tokyo, Santiago du Chili, Shanghai et Taipei se tiennent prêts à la présenter, à la commenter et à répondre aux questions des journalistes. Des serveurs informatiques situés sur tous les continents sont programmés pour envoyer des articles scientifiques et des communiqués de presse. L'heure tourne inexorablement. Tout a été soigneusement coordonné et planifié – le moindre écart perturberait tout, comme dans le cadre de nos campagnes de mesure.

Je débute ma présentation par une bourde. Tandis que, derrière moi, un film nous introduit à une vitesse croissante au cœur d'une énorme galaxie par un zoom avant, la nervosité me fait commettre un lapsus stupide : je confonds années-lumière et kilomètres – le comble pour un astronome. Mais pas le temps de rougir de honte, il faut avancer.

L'horloge électronique affiche enfin 15 heures 07. Des profondeurs et de l'obscurité infinie de l'univers, du centre de la galaxie Messier 87, émerge un anneau

incandescent. Ses contours s'esquissent, se figent sur l'écran, légèrement flous, puis l'anneau s'illumine sous les regards fascinés des spectateurs : cette image, que l'on croyait impossible à capturer, nous est enfin parvenue par le biais d'ondes radio depuis un point situé à 500 trillions de kilomètres de distance.

Les trous noirs supermassifs sont des cimetières de l'espace. Ils se forment à partir d'étoiles en train de se consumer, calcinées, en voie d'extinction. L'univers les alimente aussi en nébuleuses, en planètes et en étoiles géantes. De par leur simple masse, ils courbent l'espace vide à l'extrême et semblent pouvoir arrêter le cours du temps. Ils ne rendent jamais ce qui les approche de trop près – même les rayons lumineux ne peuvent s'y soustraire.

Mais comment peut-on voir les trous noirs s'ils ne laissent passer aucun rayon de lumière jusqu'à nous ? Comment sait-on que ce trou noir a comprimé six milliards et demi de masses solaires, ce qui l'a rendu supermassif ? L'anneau incandescent n'enveloppe-t-il pas ses ténèbres intérieures dont aucun rayon lumineux, aucun mot, ne peuvent s'échapper ?

« Ceci est la première image d'un trou noir », dis-je lorsqu'il apparaît enfin sur l'écran dans toute son ampleur<sup>1</sup>. Des applaudissements spontanés éclatent dans la salle. Toute la tension épuisante de ces dernières années me quitte. Je me sens libéré : le mystère a été dévoilé. Une créature cosmique de légende vient de prendre forme et couleur aux yeux de tous<sup>2</sup>.

Le lendemain, les journaux proclament que nous avons écrit un chapitre historique de l'histoire des sciences. Nous avons réussi à offrir à l'humanité un moment commun de joie et de stupéfaction : ces trous noirs supermassifs existent donc bien ! Ce ne sont pas des élucubrations sorties du cerveau déjanté de quelques écrivains de science-fiction.

Si cette image a pu être réalisée, c'est que dans le monde entier des gens ont poursuivi pendant des années un même objectif en surmontant toutes les difficultés et toutes les différences. Tous voulaient dépister les trous noirs, un des plus grands mystères de la physique. Cette image nous a conduits aux limites de notre savoir. Aussi fou que cela puisse paraître : c'est au bord des trous noirs que s'arrêtent nos possibilités de mesure et d'étude, et nous ne savons pas si nous pourrons un jour franchir cette limite.

Des générations de scientifiques avaient ouvert avant nous ce nouveau chapitre de la physique et de l'astronomie. Il y a vingt ans, le désir de capter l'image d'un trou noir apparaissait encore comme un rêve délirant. Jeune chercheur en quête des trous noirs, je me suis retrouvé embarqué dans cette aventure qui a conservé tout son pouvoir de fascination à mes yeux.

À l'époque, je ne me doutais absolument pas à quel point elle serait passionnante et changerait ma vie. Ce fut une expédition aux confins de l'espace et du temps, un voyage dans le cœur de millions d'hommes – même si à cet égard j'ai été le dernier à le comprendre. C'est avec l'aide du monde que nous avons réussi à capturer

cette image, à présent nous la partageons avec lui et il l'étreignait avec une ardeur que je n'aurais jamais crue possible.

Pour moi, tout a commencé il y a presque cinquante ans. Depuis le moment où j'avais pour la première fois levé les yeux vers la voûte étoilée, je rêvais du ciel comme seul un enfant peut le faire. L'astronomie est une des sciences les plus anciennes et les plus captivantes et, aujourd'hui encore, elle nous propose des perspectives radicalement nouvelles. Des premiers temps de l'humanité jusqu'à nos jours, les chercheurs, mus par la curiosité et la nécessité, n'ont cessé de bouleverser de fond en comble notre vision du monde. Nous explorons l'univers avec l'aide de notre esprit, avec les mathématiques et la physique et des télescopes de plus en plus perfectionnés. Nous utilisons les technologies les plus modernes pour parcourir le monde et même voyager dans l'univers afin d'étudier l'inconnu. Dans l'univers insondable, dans l'espace infini et le cosmos divin, les connaissances, mythes et élucubrations, croyances et superstitions ont toujours été si étroitement imbriqués qu'à l'heure actuelle, nul ne peut regarder le ciel nocturne sans se demander ce qui nous attend encore dans ces sombres étendues.

À propos de ce livre

Cet ouvrage est une invitation à entreprendre avec moi un voyage dans cet univers – dans notre univers.

Dans la première partie, nous commençons sur la Terre, passons devant la Lune et le Soleil, qui marquent le temps, les jours et les années, et faisons rapidement le tour des planètes tout en nous intéressant à l'histoire de l'astronomie, dont notre vision du monde est restée tributaire. La deuxième partie nous fait voyager dans les connaissances de l'astronomie moderne. Espace et temps deviennent relatifs. Nous découvrons comment les étoiles naissent, disparaissent et parfois deviennent des trous noirs. Pour finir, nous quittons notre Voie lactée pour accéder à un univers d'une vastitude inimaginable, grouillant de galaxies et de gigantesques trous noirs. Les galaxies racontent les débuts de l'espace et du temps, le Big Bang. Les trous noirs marquent la fin du temps.

La première image de trou noir représente une prouesse scientifique qui a nécessité des années de collaboration entre des centaines de chercheurs. L'idée de l'image, dont le germe a fini par produire une expérience de grande ampleur, les efforts que nous avons entrepris, nos passionnantes expéditions auprès des radio-télescopes du monde entier et la période excitante qui a enfin conduit à la présentation publique d'une image – cette aventure telle que je l'ai vécue occupe la troisième partie du livre.

Dans la quatrième, nous nous risquons à poser quelques-unes des dernières grandes questions de la science. Les trous noirs représentent-ils la fin ? Que se passe-t-il avant le début et à la fin de l'espace et du temps ? Quelles sont les conséquences de ce savoir pour

## LUMIÈRE DANS L'OBSCURITÉ

nous, petits êtres humains, habitants de cette Terre insignifiante et pourtant merveilleuse ? Le triomphe des sciences de la nature signifie-t-il que nous pourrions bientôt tout savoir, mesurer et prédire ? Restera-t-il de la place pour l'incertitude, l'espoir, le doute, pour un dieu ?

PREMIÈRE PARTIE

# **VOYAGE DANS L'ESPACE ET LE TEMPS**

...

Un bref aperçu de notre système solaire  
et des débuts de l'astronomie



## CHAPITRE 1

# L'HOMME, LA TERRE ET LA LUNE

### Le compte à rebours

Partons ensemble pour un voyage passionnant dans l'espace et le temps. Nous le commençons sur la Terre. Une fusée impressionnante se dresse dans un paysage verdoyant. Des oiseaux volètent innocemment autour de ce joyau de la technique. Silence lourd avant la tempête : la base spatiale est plongée dans une obscurité que l'aube dissipera sous peu. La nature ne soupçonne encore rien de l'enfer qui va se déchaîner dans quelques secondes.

Excités quoique fatigués, le personnel et les spectateurs se rassemblent sur une plateforme d'observation. De là-haut, chaque objet, chaque personne et tout ce qui se passe sont aussi mignons que dans un univers de poupée. Un des spectateurs sort son téléphone portable et se met à filmer la scène en la diffusant sur une page Web parsemée de caractères chinois et de logos qui clignotent. C'est ce stream que je suis sur Internet avec espoir et gratitude, installé à l'autre bout de la Terre dans un confortable Bed & Breakfast niché dans la verte Irlande. J'observe les événements avec fascination.

Soudain s'élève une voix off stridente. Elle est incompréhensible, hachée, métallique et vous prend aux tripes. Un compte à rebours se fait entendre, débité sur un ton monocorde. Quoi que cette langue me soit inconnue, je compte moi aussi. Dans un grondement, une lumière jaune rougeâtre surgit au pied de la fusée, illuminant l'obscurité. L'allumage des réacteurs déclenche un vacarme assourdissant jusque dans la paisible Irlande – bien que le son ne me parvienne que par l'intermédiaire de mon Notebook. Le sol tremble, les structures de soutien sont tombées, la fusée se détache et décolle majestueusement, suivie d'une traînée de chaleur éblouissante telle une comète inversée, disparaît de notre champ de vision et fonce dans l'espace.

Je me sens ramené au jour du lancement de la navette spatiale Discovery, auquel j'ai pu assister à l'aube du 11 février 1997, à Cap Canaveral, avec ma famille, fatiguée mais remplie d'excitation. Je revois encore le regard fier de ma fille de 4 ans contemplant de loin la fusée haute comme une tour, la veille du grand jour. Ses yeux brillants me renvoyaient l'éclat de mon propre regard.

Vingt et un ans plus tard, en ce 20 mai 2018, je ne vois qu'une transmission en direct pixélisée et saccadée en provenance de la Chine. Pourtant, je sais exactement ce qu'on ressent là-bas et il s'agit d'un lancement très spécial. Car, à bord, il y a une partie de moi : une expérience de mon équipe de Nimègue. Je me sens de nouveau comme un enfant. La fusée a un objectif précis : la face cachée de la Lune.

En pensée je m'envole avec elle, jusqu'à la Lune et bien plus loin – ainsi que je l'ai déjà fait de multiples fois. Je m'envole là où ma nostalgie m'a toujours attiré : dans l'espace.

### Dans l'espace

Une paix céleste : ce qu'on remarque en premier, une fois dans l'espace, c'est le silence infini. Les réacteurs sont coupés, à l'extérieur tous les bruits s'évanouissent. Le télescope spatial Hubble, placé en orbite à 550 kilomètres au-dessus de la Terre – presque soixante-dix fois la hauteur de l'Everest –, se déplace dans une atmosphère qui est environ cinq millions de fois plus ténue qu'à la surface de la Terre<sup>1</sup>. Les ondes sonores, qui sont des vibrations de l'air, ne sont plus perceptibles pour l'oreille humaine : froissements, paroles, on ne pourrait rien entendre, pas même une explosion surpuissante sur la Terre.

En tant qu'astronome, je me sers de télescopes spatiaux en orbite autour de la Terre, j'écoute les récits des astronautes qui s'y sont rendus et regarde les photos qu'ils ont rapportées. En pensée, je flotte avec ces appareils dans l'espace, en apparence libéré du bruit et de la pesanteur, tout en fonçant témérairement à une vitesse de 27 000 kilomètres heure. Les puissantes forces centrifuges pourraient me projeter hors de l'orbite, mais leur compensation par l'attraction terrestre me maintient dans ma trajectoire. C'est le secret de tout mouvement

orbital autour d'un corps céleste. L'apesanteur ne signifie pas être débarrassé de la pesanteur. En orbite, on reste soumis à la pesanteur, mais comme la force centrifuge et la force d'attraction s'équilibrent parfaitement, on se sent en apesanteur. En réalité, on est en chute libre, mais on ne cesse de manquer la Terre parce qu'on décrit autour d'elle une grande trajectoire orbitale comme tracée au compas. Si on ralentissait, la trajectoire se réduirait et deviendrait de plus en plus inclinée jusqu'au moment où la chute libre se finirait par la création d'un cratère d'impact sur la Terre. Ce qui n'est pas le but recherché !

Les frottements de l'air qui affectent le véhicule spatial sont si minimes qu'on pourrait tourner autour de la Terre pendant des années à vitesse presque constante<sup>2</sup> sans avoir ne serait-ce qu'une fois à mettre nos moteurs en route.

Pendant notre déplacement en orbite, nous jouissons d'une vue unique sur la Terre. Tels des dieux, nous contemplons cette perle bleue sur le velours noir de l'univers. Continents, nuages et mers déploient d'incroyables effets de couleurs. La nuit, des éclairs, des villes étincelantes et des aurores boréales illuminent la scène terrestre, offrant un spectacle extraordinaire. Les frontières disparaissent et notre regard surplombant nous fait réaliser que la Terre est la patrie commune de tous les hommes. La limite qui nous sépare du froid de l'espace est claire et nette. C'est là-haut que nous comprenons combien est mince la couche d'air qui nous protège de l'hostilité de l'espace et permet à la vie de se développer. Les phénomènes météorologiques et le climat ont

leur siège dans une bande étroite surmontant la Terre. Elle paraît tout à coup si fragile, si vulnérable, cette fière planète. Ces perspectives et aperçus passionnants, nous les devons à la technologie moderne. Celle-là même dont nous faisons également un usage inconsidéré qui détruit nos moyens de subsistance et cette incomparable Planète bleue.

Chaque fois que je regarde ces images magnifiques de la Terre, je sens la solitude et le vide, la souffrance et la misère qui y règnent. « Il étend le septentrion sur le vide, Il suspend la terre sur le néant<sup>3</sup> », s'exclame Job éprouvé par Dieu il y a des milliers d'années. Au milieu du néant céleste tendu comme une toile de tente noire – notre globe terrestre ! L'auteur de la Bible n'avait pas la possibilité de voir la Terre d'en haut, cependant dans ses visions il la percevait déjà comme un tout. Les représentations que l'humanité se faisait autrefois de notre monde sont aujourd'hui remplies d'images nouvelles que nous offre la technologie actuelle. Un essaim de satellites effectue en permanence des repérages sur notre planète et photographie les nuages, les continents et les océans avec une précision à couper le souffle.

Job, qui voit la Terre suspendue dans le néant, adresse à Dieu une plainte profondément humaine : pourquoi cette souffrance dépourvue de sens ? Aujourd'hui encore, cette planète est une juxtaposition de souffrances et de beautés. Depuis l'espace, l'individu est indiscernable. La souffrance ne se comprend que de près – de loin, tout paraît sublime et incomparable sur la Terre. D'en haut, même les ouragans, les inondations, les forêts

en flammes exercent une fascination morbide. Dans l'espace, on est très loin de la souffrance des individus, qui se démultiplie ici-bas, et nos problèmes terrestres sont incompréhensibles. Ce « regard tout-puissant » ne passe-t-il pas souvent à côté de l'homme même ?

La persistance des changements que ces recherches scientifiques factuelles et techniques exercent jusque sur les astronautes aguerris est plus que surprenante. Après le cosmonaute Iouri Gagarine en 1957, 550 personnes environ ont effectué un voyage dans l'espace et presque toutes ont rapporté que l'étonnement ressenti face à la sublime fragilité de la Terre les a considérablement impressionnées et changées en profondeur. Pouvoir embrasser le globe d'un regard semble provoquer un état similaire à l'ivresse. L'*Overview effect*, tel est le nom que l'Américain Frank White a donné à ce phénomène, qu'il a étudié et dont il a décrit en détail les effets psychologiques. Que déclenche en nous la vue du globe terrestre ? Quelles sont les transformations qu'elle induit en nous ? Comment tirer parti de cet effet ? Les médecins s'y intéressent depuis sa première description. La Terre est unique en son genre. Pour autant que nous le sachions, il n'existe rien de comparable dans l'univers. C'est aussi le sentiment qu'éprouvent les astronautes. Flotter au-dessus de la Terre tels des anges et voir tout d'en haut ne nous laisse pas de marbre, nous autres humains. Laissons-nous donc inspirer par les images nouvelles de l'espace lui-même et par celles auxquelles il nous donne accès sans pour autant perdre l'homme de vue.

## Le temps est relatif

Cependant, dès que nous avons atteint l'orbite, notre perspective de l'espace et du temps change également. Outre une vue différente sur notre planète natale, la Terre, nous acquérons une perception autre des jours, des mois et des années. « Car mille ans sont, à tes yeux, Comme le jour d'hier, quand il n'est plus<sup>4</sup> », est-il dit dans un célèbre verset de psaume. Le temps est relatif. Les hommes l'ont pressenti depuis des âges immémoriaux, mais c'est dans l'espace qu'on l'expérimente le plus clairement.

Lorsque j'ai écrit mes premiers programmes d'observation pour le télescope spatial Hubble, j'ai dû segmenter les séquences d'instructions en blocs de 95 minutes, parce que c'est le temps qu'il faut au télescope pour effectuer une révolution autour de la Terre. Le Soleil se levait et se couchait toutes les 95 minutes. Dans l'espace, une journée de ce genre fait 95 minutes. Les astronautes de la Station spatiale internationale (SSI) connaissent des levers de Soleil toutes les 90 minutes. Et c'est également ce que je vivais à mon bureau, tandis que je préparais mes observations et flottais en pensée dans l'univers.

Cependant la relativité du temps, ce n'est pas simplement un changement de mesure pour la durée de la journée. Dans l'espace, en effet, quoique cela paraisse incroyable, les montres ne se comportent pas comme sur la Terre. Au cours d'un trajet de 20 000 kilomètres effectué en orbite autour de la Terre, elles avancent de

39 microsecondes par jour. Dans soixante-dix ans, nos montres terrestres auront donc une seconde de retard sur nos montres de l'espace. Cela paraît peu, mais nous pouvons désormais mesurer cette différence minime sans aucun problème. Cet écart insignifiant, justement, manifeste à lui seul une idée fondamentale de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein : le temps est véritablement relatif. Cette théorie ne décrit pas seulement notre système solaire, mais aussi les trous noirs et le tissu spatio-temporel de l'espace dans sa totalité.

Le chemin qui a conduit à ces connaissances a été exceptionnellement long. Il commence à grande échelle avec des découvertes aussi essentielles que celles de la structure et des lois de notre système solaire pour arriver à la compréhension de l'ensemble du cosmos. Et à petite échelle, ce chemin débute avec la découverte du comportement paradoxal de la lumière, tantôt onde, tantôt particule, et se trouve évidemment lié à la célèbre théorie de la relativité d'Einstein.

La clé de tout cela réside dans une compréhension précise des étranges propriétés de la lumière. Fait particulièrement étonnant : la lumière ne permet pas seulement la vision, laquelle nous a permis de découvrir la Terre, la Lune et les étoiles. Lumière, temps, espace et gravitation sont aussi très étroitement liés.

Jetons un regard rétrospectif sur l'histoire de la physique moderne. Pour Isaac Newton, le père de la théorie de la gravitation, la lumière n'était constituée que de corpuscules, c'est-à-dire de particules d'une taille infime. Au XIX<sup>e</sup> siècle, le physicien écossais James Clerk Maxwell,

se fondant sur les travaux pionniers du génial Michael Faraday, élabore une théorie selon laquelle la lumière et toutes les formes de rayonnement sont des ondes électromagnétiques. Le rayonnement radio des réseaux informatiques locaux sans fil (WLAN), des téléphones portables ou des autoradios, le rayonnement thermique des appareils de vision nocturne, les rayons X qui nous permettent de visualiser les os, ou même la lumière visible que perçoivent nos yeux – tous sont donc des oscillations de champs électriques et magnétiques. Ils ne se distinguent les uns des autres que par la fréquence des oscillations et le mode de production et de mesure. Mais, en fin de compte, ces oscillations renvoient toutes au même phénomène – la lumière : rayonnement radio, lumière infrarouge, rayons X et lumière visible.

Dans le domaine des fréquences de téléphonie mobile, on compte un milliard de vibrations par seconde et la longueur d'onde dépasse 20 centimètres. Dans la lumière visible, ces vibrations sont de l'ordre de plusieurs trilliards par seconde et sont cent fois plus petites que le diamètre d'un cheveu. Comme les ondes lumineuses d'une couleur et d'une fréquence données oscillent toujours au même rythme, la lumière constitue un repère parfait pour une montre et pour la mesure de toute chose, lorsqu'il s'agit de mesurer le temps. À l'heure actuelle, les montres optiques les plus précises sont réglées à un degré de précision de  $10^{-195}$ . Sur une durée de 14 milliards d'années, âge actuel de l'univers, deux de ces montres accuseraient un écart d'une demi-seconde !

Une exactitude dont les générations précédentes n'auraient même pas osé rêver !

Mais qu'est-ce qui oscille au juste ? Longtemps, on a cru que l'espace était rempli de ce qu'on appelait l'« éther ». Pas le solvant, mais un milieu hypothétique où les ondes électromagnétiques, par exemple les ondes lumineuses ou radio, se meuvent et se propagent dans l'air à l'instar des ondes sonores.

Une des propriétés les plus surprenantes établies par les équations de Maxwell et qui, aujourd'hui encore, stupéfie les physiciens, est le fait que, dans le vide, la lumière de chaque couleur se déplace toujours à une vitesse similaire, constante, quelle que soit la vitesse à laquelle on se trouve soi-même. Les rayons X possèdent la même vitesse que le rayonnement radio ou un rayon laser et, chez Maxwell, la vitesse de la lumière est indépendante de celle du récepteur ou de l'émetteur. On savait au moins depuis les travaux d'Ole Rømer et de Christian Huygens, qui, à la fin du xvii<sup>e</sup> siècle, avaient mesuré les mouvements des lunes de Jupiter, que la vitesse de la lumière n'était pas infinie<sup>6</sup>. Mais ne devrait-elle pas varier lorsqu'on se déplace à grande vitesse dans le mystérieux éther ou qu'on reste immobile par rapport à lui ?

Si je suis sur l'eau avec une planche de surf par un violent vent de mer et que je pagaie perpendiculairement au déferlement des vagues, celles-ci arrivent sur moi à une vitesse élevée – aussi élevée que celle avec laquelle elles viennent battre la côte. Mais si je change de direction et que je surfe à toute allure avec le vent

et les vagues, je deviens aussi rapide que la vague sous ma planche. Au regard de ma planche, la vitesse des vagues est minime, au regard de la côte, la vitesse de ma planche est très élevée.

C'est la même chose avec les ondes sonores. Si je suis à vélo avec le vent dans le dos, le son d'un klaxon automobile derrière moi me parviendra un peu plus vite que s'il n'y a pas de vent, et je serai averti un peu plus tôt. Si je roule contre le vent, ce klaxon m'arrivera un peu plus tard. Le son doit aller contre le vent. Si je pouvais pédaler à une vitesse supersonique par rapport au vent, je n'entendrais même pas le klaxon. Si j'accélère et rattrape mon propre son, alors je franchirai le mur du son en produisant une détonation, parce qu'un grand nombre de mes bruits parviendront en même temps à l'auditeur. Mais contrairement aux pilotes de jet, aucun cycliste n'a réussi à ce jour à produire un bang supersonique.

Il y a plus d'un siècle, on pensait que les ondes radio se comportaient de manière similaire. L'éther remplissait l'espace vide – comme l'air, notre atmosphère – et, dans son orbite autour du Soleil, la Terre, tels mon vélo ou ma planche de surf, labourait l'éther à 100 000 kilomètres heure. Si l'on mesure la vitesse de la lumière dans le sens du mouvement de la Terre autour du Soleil, cette « vitesse de la lumière » devrait en fait être très différente du résultat qu'on obtiendrait si on la mesurait à angle droit ou dans le sens exactement inverse – selon que la Terre surfe sur l'éther avec le vent dans le dos ou en face.

C'est précisément cet effet dont les physiciens américains Albert A. Michelson<sup>7</sup> et Edward W. Morley voulaient apporter la preuve à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Ils mesurèrent donc la vitesse relative de la lumière dans deux tubes perpendiculaires l'un à l'autre. L'expérience fut un échec retentissant. Pas moyen d'établir une différence significative. Dès lors, il n'y avait aucun indice prouvant l'existence de l'éther – ce n'était qu'une illusion.

Les échecs peuvent avoir des conséquences révolutionnaires. Celui-là devint une des expériences clés ayant ouvert des perspectives novatrices à la physique et à l'astronomie. Car l'échec totalement inattendu de la théorie de l'existence de l'éther fit vaciller des édifices théoriques entiers et permit de se débarrasser de vieux schémas de pensée pour se tourner vers de toutes nouvelles idées<sup>8</sup>. Notamment celles du jeune Albert Einstein, le plus radicalement prêt à adopter une approche différente et nouvelle et à réviser les fondations théoriques de la physique. Pendant que d'autres physiciens continuaient de foncer dans le mur, Einstein pénétrait déjà dans une ère nouvelle où il n'existait plus d'espace ni de temps absolus. Une théorie audacieuse prit naissance, la théorie de la relativité, avec laquelle il invalidait une vision du monde physique quasi centenaire.

Un petit garçon rêve de la Lune

Maintenant que nous avons tourné tout notre soûl autour de la Terre, nous pouvons enfin passer à l'étape

suivante de notre voyage spatial et mettre le cap sur la Lune. Le « voyage vers la Lune » est un vieux rêve de l'humanité. Le 21 juillet 1969, Neil Armstrong posa le pied sur la surface de la Lune, accomplissant ainsi ce qui fut peut-être le pas le plus célèbre jamais réalisé par un homme, et le rêve devint réalité. Quelques années plus tard encore, j'eus l'occasion de sentir l'importance qu'avait revêtue cet instant.

C'est une chaude journée de l'été 1971, dans la commune idyllique de Strombach, du pays de Berg. L'horizon est orné de collines douces et de forêts verdoyantes, un groupe d'enfants joue joyeusement à l'extérieur dans un petit lotissement de maisons individuelles. Seaux et pelles, un tricycle avec une barre de poussée et deux ou trois ballons, ils n'ont pas besoin de plus pour s'amuser. Les adultes, assis dans leurs jardinets, gardent tranquillement un œil sur eux.

Seul un petit garçon joufflu manque à l'appel. Installé dans une pièce sombre, il regarde avec fascination les images noir et blanc tremblantes, granuleuses, d'un grand téléviseur à tube cathodique. « Falcon », le module lunaire d'Apollo 15, venait d'alunir et envoyait ses images à la Terre. Dans la famille Falcke, l'enthousiasme pour les alunissages s'était rapidement dissipé après la sensation qu'avait représentée le succès des premiers voyages spatiaux.

Le petit garçon, lui, n'arrive pas à s'arracher à l'écran. Âgé de presque 5 ans, il n'a encore aucune idée de la taille de l'univers ni de la distance que les astronautes de la NASA ont dû parcourir pour se rendre sur la Lune. Et

il ne saurait même soupçonner l'énergie qu'a nécessité cet exploit technologique ni l'importance de cette performance scientifique. Pourtant, tout au fond de lui, il sent comme cette entreprise téméraire a dû être incroyable et fascinante. Le petit garçon absorbe chaque seconde de cette aventure, chacune d'elles enflamme son imagination. Il doit y avoir tant de choses possibles si un homme peut d'ores et déjà marcher, sauter sur la Lune et même se déplacer à sa surface avec un véhicule, comme l'ont fait les astronautes d'Apollo 15 ! Que ne pourrait-on encore découvrir dans ce ciel infiniment grand !

Ce petit garçon, c'était moi, bien sûr. Nous étions allés passer quelques jours chez ma grand-tante Gerda. À l'époque, les astronautes entourant le commandant David Scott m'apparaissaient comme des superhéros de bande dessinée. Lui et deux membres de l'équipage, James Irwin et Alfred Worden, se posèrent avec le Falcon tout près de la chaîne des Apennins, une des montagnes lunaires les plus imposantes. En mettant le pied sur la Lune, David Scott dit quelque chose de profondément humain : « *I sort of realize there's a fundamental truth to our nature: Man must explore!* » – « Je réalise qu'il y a une vérité fondamentale inhérente à la nature humaine : l'homme doit explorer ! » – « Oui, pensé-je, ça c'est moi ! »

Comme beaucoup d'enfants, je voulais devenir astronaute. Par la suite, j'ai compris sans doute intuitivement que je n'en avais pas vraiment les capacités. Je suis plutôt polyvalent, sportif, je savais travailler en équipe, j'étais bon tant sur le plan théorique qu'expérimental,

la technologie ne me posait pas de problème et j'étais résistant au stress. Mais j'ai les mains qui tremblent très légèrement et, en situation de forte pression, je commets trop d'erreurs. Des années plus tard, j'en ai discuté avec les astronautes allemands Ulrich Walter et Ernst Messerschmid lors d'un congrès d'aéronautique. Ils savaient sans arrogance ce dont ils étaient capables. « Nous autres astronautes devons nous soumettre à une interminable procédure de sélection, me dit l'un d'eux. Tous les paramètres doivent être bons. » Ce n'était pas mon cas. Il n'empêche, je n'ai jamais abandonné mon rêve d'approcher la Lune.

En fonction de l'endroit où se trouve la Lune sur son orbite elliptique, un vaisseau spatial doit parcourir entre 356 000 et 407 000 kilomètres pour rejoindre notre satellite. Peu de moteurs automobiles sont capables d'une telle performance kilométrique, mais la lumière, elle, n'a besoin que de 1,3 seconde pour effectuer ce trajet. Astronomiquement parlant, le fait de savoir que même les meilleures voitures ne dépassent guère une seconde-lumière de distance produit un effet quelque peu dégrisant.

La vitesse de la lumière, en effet, est la seule constante dans l'univers. Il est donc tout à fait logique d'exprimer la taille de l'univers à l'aide d'unités de mesure en rapport avec la lumière. L'année-lumière est donc en réalité une unité de mesure de distance et non de temps, comme pourrait le laisser croire le terme « année ». En astronomie, on parle parfois de plusieurs milliards d'années-lumière, ce qui laisse deviner l'énormité des

distances dans le cosmos. Pour les astronomes, la Lune n'est ni notre jardinier ni notre arrière-cour cosmiques. Elle constitue tout au plus le seuil que nous franchissons lors de notre voyage dans l'univers.

La distance d'une seconde-lumière signifie aussi que tout ce que nous voyons de la Lune à partir de la Terre a déjà plus d'une seconde d'âge. Lorsque nous regardons dans l'espace, nous voyons toujours son passé. Pour la Lune, ce n'est qu'une grosse seconde, pour les galaxies que nous étudions nous regardons des millions et des milliards d'années en arrière.

La lumière nous parvient donc toujours avec un « retard » – faible quand il s'agit de sources lumineuses situées sur la Terre, considérable lorsqu'elle vient des profondeurs de l'espace. De ce fait, nous ne pouvons jamais savoir ce qui se passe en cet instant même quelque part ailleurs – que ce soit dans l'univers, voire ici, sur terre.

Le retard de la lumière en provenance de la Lune est concrètement mesurable et perceptible. Un collègue néerlandais a célébré son mariage dans un radiotélescope et envoyé son « oui » par ondes radioélectriques sur la Lune, où il s'est réfléchi sur le sol pour revenir 2,6 secondes plus tard dans la salle de contrôle. Cela a été si rapide que la mariée n'a pas eu le temps de prendre la fuite – le mariage a été conclu avec succès. Ce fut sans doute le premier mariage « rebond de Lune » de l'histoire du monde<sup>9</sup>.

Aujourd'hui, on envoie régulièrement des rayons laser sur la Lune pour des raisons purement techniques et scientifiques. Ceux-ci se reflètent sur des miroirs installés

par les missions Apollo – n'en déplaise aux conspirationnistes, qui soutiennent que la NASA n'a jamais atterri sur la Lune. Les miroirs sont toujours en activité. Le retard de l'écho lumineux permet de mesurer avec une extrême précision le mouvement et la distance de la Lune et de tester ainsi les prédictions de la théorie de la relativité générale.

On a observé en outre que, chaque année, la Lune s'éloignait de nous de quatre centimètres et que la rotation de la Terre connaissait un léger ralentissement. La Terre et la Lune sont liées par la gravitation et, sous l'effet des forces de marée, elles se freinent un peu mutuellement dans leur propre rotation. Les mois et les jours rallongent annuellement d'une fraction de seconde. En principe, cela ralentit légèrement notre vieillissement, mais accélère un peu notre mort – si nous exprimons notre âge en mois et en jours. Il y a 4,5 milliards d'années, le jour ne durait que six heures<sup>10</sup> – une idée cauchemardesque pour un bourreau de travail tel que moi !

De ce fait, la rotation de la Lune connaît déjà un ralentissement presque total : pendant sa révolution autour de la Terre, la Lune n'effectue très précisément qu'une seule rotation sur elle-même, ce qui explique qu'elle nous montre toujours la même face. Par conséquent, c'est toujours le même visage aimable qui nous sourit. Nous ne voyons sa face cachée que depuis les premières missions lunaires. Ce n'est pas sa face obscure, comme on l'a souvent dit poétiquement, car le Soleil l'éclaire quinze jours par mois. Elle reste toutefois un monde mystérieux et quasi inexploré.

Le rêve d'aller sur la Lune ne m'a jamais vraiment quitté et, d'une certaine manière, il s'est réalisé grâce au radiotélescope LOFAR, dont j'ai eu la responsabilité pendant un temps aux Pays-Bas<sup>11</sup>. Le LOFAR (Low-Frequency Array) est un réseau d'antennes radio travaillant dans le domaine des basses fréquences. Elles sont connectées à une unique station d'observation – un ordinateur extrêmement performant rassemble les données et crée un télescope virtuel. Il doit nous permettre de remonter presque jusqu'au Big Bang et nous aider à trouver tous les trous noirs actifs dans l'univers.

À l'heure actuelle, le réseau LOFAR est constitué de 30 000 antennes situées dans divers lieux européens – il est devenu un télescope continental. Cependant l'endroit idéal pour recevoir sans parasites des ondes radio cosmiques, c'est la face cachée de la Lune. Car, sur terre, le plus grand problème des astronomes est le rayonnement parasite produit par les émetteurs radio et la déformation des ondes radio provoquée par leur pénétration dans la couche supérieure de l'atmosphère, la ionosphère. Comme nous ne voyons jamais la face cachée de la Lune depuis la Terre, celle-ci n'est pas soumise à un rayonnement parasite terrestre. J'ai coutume de dire en plaisantant qu'il n'y a peut-être pas de meilleur endroit sur terre que la Lune pour pratiquer la radioastronomie. Cependant ériger des antennes sur la Lune m'a longtemps paru un rêve irréalisable.

Dans les sciences et les voyages spatiaux il faut être persévérant. Et, parfois, il se passe quelque chose d'imprévisible. C'est ce que j'ai connu en octobre 2015,

lorsque le roi des Pays-Bas, Willem-Alexander, lors d'une visite d'État en Chine, a conclu avec le président chinois Xi Jinping un accord dans le domaine spatial. Les Chinois proposaient d'emporter dans l'espace une des antennes lunaires que nous avons élaborées. Ce serait la première fois qu'un instrument néerlandais figurerait dans une mission lunaire chinoise. En mai 2018, une fusée de l'Agence spatiale nationale chinoise (CNSA) décolla de la base de lancement de Xichang avec cette antenne à bord. C'était ce lancement que j'avais suivi en direct sur Internet pendant mes vacances en Irlande, à l'époque même où naissait la toute première image d'un trou noir. À ce moment-là, toute mon énergie était accaparée par cette image, je n'avais jamais vécu de période plus éprouvante dans toute mon existence de scientifique. Aussi avais-je dû, le cœur lourd, abandonner mon rêve d'enfant à mes collaborateurs.

Notre station d'observation radio est installée à bord du satellite de télécommunications chinois Queqiao, le « pont des pies ». Celui-ci a été placé à une distance comprise entre 40 000 et 80 000 kilomètres derrière la Lune. Il a pour fonction essentielle de retransmettre des signaux radio de la face cachée de la Lune vers la Terre. Mais, à l'automne 2019, nous avons sorti nos antennes et cherchons désormais à capter des signaux en provenance du cosmos. Et nous essayons de percevoir un signal radio extrêmement faible qui, d'après nos théories actuelles, a dû surgir dans des temps très reculés – il y a des milliards d'années, avant même la naissance des premières étoiles. Il contient un écho radio du

Big Bang, le commencement de l'espace et du temps. Il nous faudra sans doute des années pour venir à bout de l'analyse extrêmement difficile de ces données et il est probable que seules des missions futures seront à même de découvrir quelque chose.

Cependant le satellite m'a permis un aperçu unique en son genre tandis qu'il était en route vers la Lune. Alors que Queqiao rejoignait sa position, le petit appareil photo embarqué a pu prendre un instantané représentant la Lune et, derrière, presque aussi grosse, la Terre. Dans un coin du cliché, on aperçoit un bout de notre antenne non encore déployée.

En le voyant, j'ai retrouvé en moi le petit garçon devant le vieux téléviseur noir et blanc : devant moi se dressait la mystérieuse face cachée de la Lune, et je distinguais, petite et floue, notre Planète bleue, sur laquelle je me trouvais. Je n'étais jamais allé moi-même sur la Lune mais, à cet instant, je me suis senti « chez moi » là-bas. Depuis, je ne cesse de la regarder en pensant : désormais, il y a aussi une petite partie de moi là-haut.

## CHAPITRE 2

### SYSTÈME SOLAIRE ET CONCEPTIONS DU MONDE

#### Le Soleil - notre prochaine étoile

Une fois que nous quittons la Lune, notre itinéraire nous conduit alors vers le Soleil. Depuis la Terre, nous devrions parcourir une distance de 150 millions de kilomètres. La lumière effectue le trajet en 8 minutes – nous sommes donc à 8 minutes-lumière du Soleil. Et en tournant les yeux vers le Soleil, on regarde dans le passé de 8 minutes.

Le Soleil est l'étoile qui nous fait don de la vie à presque tous égards. Comme nul autre objet céleste – après la Terre –, il crée des conditions de vie favorables à l'être humain, exerce son action sur la météo, a durablement influencé la culture humaine et organise nos activités quotidiennes par l'alternance du jour et de la nuit. Nous ne comprenons la valeur du Soleil que lorsqu'il nous fait défaut. Rien d'étonnant, dès lors, à ce que les éclipses solaires aient autrefois bouleversé les hommes et les sociétés, et cela reste encore un peu le cas.

À l'été 1999, je me trouve un matin devant la directrice de notre école primaire à quémander son autorisation

pour pouvoir faire un voyage avec ma fille. Nous sommes la veille du 11 août, date à laquelle une éclipse solaire totale obscurcira une partie de l'Allemagne et de la France. Cela fait des jours que les médias annoncent l'événement. Les lunettes de protection spéciales ont toutes été vendues, toute l'Allemagne attend l'assombrissement cosmique. Pour ma fille et moi, l'occasion est unique, car je ne serai plus en vie pour la prochaine éclipse comparable qui aura lieu sous nos latitudes, en 2081.

Cependant la réglementation scolaire ne s'embarrasse pas de considérations sentimentales. Chez nous, la législation permet de ne pas faire cours par temps de canicule, mais rien n'est prévu pour les éclipses solaires. La directrice est compréhensive, se gratte l'oreille, me fait remarquer que même l'événement cosmique du siècle ne lui donne pas le droit de dispenser les élèves de cours – pas même les enfants de parents astronomes. « Cela dit, ajoute-t-elle d'un air entendu, l'obligation d'assister aux cours ne s'applique pas si vous devez vider votre appartement à l'improviste pour des raisons professionnelles. Dans ce cas, Jana peut vous accompagner. » Je la remercie pour cette information et prends un jour pour vider mon appartement – sur le papier.

Rempli d'excitation et de curiosité, je prends la voiture avec ma fille de 6 ans. Les chercheurs sont parfois des obsessionnels en quête des secrets de l'univers qui se rendent aux quatre coins du monde pour satisfaire leur curiosité. Nous entamons donc notre petite expédition.

Le cône d'ombre de l'éclipse ne sera visible que peu de temps aux alentours de midi depuis une bande étroite située dans quelques régions du sud-ouest de l'Allemagne. C'est là que je veux être, car c'est le seul endroit où l'on peut assister au moment le plus fascinant d'une éclipse solaire totale : l'obscurité menaçante, qui, en plein jour, plonge subitement le monde dans les ténèbres. Quand on a vécu cela, on sentira dorénavant toute sa vie l'importance de la lumière du Soleil pour notre vie et pour la vie sur terre. Il n'y a qu'un seul problème, qui n'est que trop familier aux astronomes : la météo n'est pas favorable. Partout en Allemagne, le ciel est couvert.

Nous partons de Frechen, la ville où je vis, en direction de l'ouest – à la recherche du bon endroit. Nous poursuivons désespérément la lumière du soleil, qui perce çà et là les nuages. Nous atterrissons finalement en France, dans un champ à proximité de Metz. Il ne reste plus que quelques minutes avant le début de l'éclipse. Juste à ce moment-là, le ciel se dégage et le soleil apparaît. Parfois, même en tant qu'humble chercheur on doit s'en remettre à la chance. Le disque lunaire glisse lentement et majestueusement devant le Soleil et l'obscurcit enfin en totalité. Nous sommes exactement au bon endroit au bon moment. C'est unique et merveilleux. En pleine obscurité, nous voilà gratifiés d'un rare moment d'illumination collective au sens propre du terme.

L'éclipse solaire est l'expression d'un des hasards cosmiques les plus singuliers de notre système solaire. Car c'est uniquement parce que la Lune, beaucoup plus

petite, se trouve exactement à la bonne distance de la Terre, qu'elle peut masquer entièrement le grand disque solaire. Si elle était un peu plus proche de nous, elle masquerait davantage que le Soleil. Et si elle était plus éloignée, on verrait toujours un bord clair et aveuglant. Mais ainsi, la Lune couvre exactement le bouillant Soleil, nous offrant un spectacle très particulier : celui de la couronne solaire. Celle-ci est constituée d'un gaz culminant à plusieurs millions de degrés, parfois agité et projeté dans les airs par de gigantesques éruptions, qui, tels des volcans solaires, crachent du plasma brûlant dans la couronne.

Lors d'une éclipse solaire, nous voyons immédiatement que le Soleil n'est pas une étoile paisible, mais un mystérieux et bouillonnant chaudron de sorcière. Cependant, lors des grandes et petites explosions qui ont lieu à la surface du Soleil se produit un autre événement non moins magique : la création de minuscules particules fantômes, envoyées dans l'espace. Il s'agit de restes d'atomes détruits par la chaleur du Soleil et expédiés dans le système solaire à une vitesse extrême. Un noyau d'atome contient des protons de charge positive et des neutrons de charge nulle, tous de masse à peu près égale. Ils sont entourés d'une ou de plusieurs coquilles d'électrons, beaucoup plus légers et porteurs d'une charge négative.

Ces particules d'énergie qui circulent à une très grande vitesse ont reçu le nom un peu trompeur de « rayonnement cosmique ». En pénétrant dans l'atmosphère terrestre, ces rayons cosmiques, ou disons plutôt ces

particules cosmiques, produisent, entre autres, les spectaculaires aurores boréales qui font scintiller et danser d'une manière surnaturelle le ciel sombre de la Laponie ou de l'Alaska. Cependant les flux de particules résultant de violentes tempêtes solaires sont également importants pour d'autres raisons. Ils peuvent détruire l'électronique sensible des satellites, modifier le champ magnétique terrestre et empêcher la propagation des ondes radio. Lors de tempêtes particulièrement violentes, ils peuvent même créer des surtensions sur notre réseau électrique et paralyser l'approvisionnement énergétique de villes entières. Heureusement, ces tempêtes sont rares et les bulletins météorologiques réguliers qui ont été instaurés concernant l'espace permettent désormais de prendre en temps voulu les mesures préventives qui s'imposent.

Seule une éclipse solaire nous permet de voir à l'œil nu d'où les particules cosmiques tirent leur origine. Ce spectacle produit sur moi une impression particulièrement forte. Par mes études, je sais que cette physique des particules que je peux voir de mes yeux en compagnie de ma fille sur le pourtour du Soleil a cours également au bord des trous noirs, mais dans des proportions bien plus extrêmes. L'interaction des champs magnétiques et des turbulences joue au ping-pong avec ces infimes particules chargées, les projette çà et là en accroissant leur énergie. Des électrons, ainsi accélérés et déviés dans le champ magnétique, baignent le Soleil mais aussi les environs immédiats des trous noirs d'un rayonnement radio. Des particules cosmiques qui se créent lors d'explosions d'étoiles ou à proximité de

trous noirs atteignent même des énergies bien plus élevées que celle du Soleil et vagabondent dans les champs magnétiques agités de notre Voie lactée et de l'espace.

Un certain nombre d'entre elles pénètrent dans notre atmosphère, où elles peuvent être mesurées. Des expériences de grande ampleur, menées dans des endroits comme l'observatoire Pierre-Auger en Argentine où je travaille également, effectuent des mesures de ces particules à l'aide de détecteurs répartis sur des milliers de kilomètres carrés.

Si nous ne comprenions pas la physique du Soleil et des particules cosmiques, la physique des trous noirs nous resterait également incompréhensible. Chose étonnante, dans l'ensemble de l'univers, tout est lié par les mêmes processus et obéit aux mêmes lois : la lumière qui entoure les trous noirs, les éruptions du Soleil et les aurores polaires sur la Terre. La physique qui s'exerce dans le cosmos est un interminable ruban tressé.

Tout cela se manifeste pour ainsi dire sous mes yeux lors de l'éclipse solaire du 11 août 1999. Pour ma fille, c'est une agréable excursion associée à la curiosité et à la soif de l'aventure. Par la suite, elle a bricolé des lunettes en aluminium pour les gens en les invitant à regarder le Soleil. Qu'est-ce que les voisins ont bien pu penser ?

Tandis que je contemple le Soleil avec mon enfant, je suis saisi de respect devant les forces de l'univers et particulièrement séduit par la lumière rougeoyante du Soleil obscurci qui brille à travers le léger voile de nuages. Cet anneau bouillonnant a quelque chose de puissant et de presque hypnotique. Il constituera pour moi une source

d'inspiration lorsqu'il faudra choisir des couleurs pour notre prévision d'image de trou noir.

J'ai le privilège de savoir quels sont les mécanismes cosmiques qui donnent naissance aux éclipses solaires. Mais depuis l'âge de la pierre jusqu'à nos jours, les hommes ont toujours eu peur de ce genre d'événement. Autrefois, surtout, ils y voyaient un message délivré par des forces divines. Des documents vieux de plus de 4 000 ans font état d'un phénomène d'obscurcissement de ce type. En Chine, des astronomes de la cour essayaient d'anticiper ces phénomènes en se fondant sur leurs observations du ciel, mais ils n'y parvenaient pas toujours. Une vieille légende rapporte même que deux savants qui n'avaient pas été capables de prédire avec exactitude le moment d'une éclipse solaire et qui étaient légèrement éméchés avaient été exécutés sur l'ordre du souverain<sup>12</sup>. Il est bien possible que ce célèbre épisode ne soit pas véridique. À l'heure actuelle, les astronomes sont en mesure de prédire les éclipses avec précision et sans avoir rien à craindre. Cela dit, les erreurs restent fréquentes lorsque nous travaillons aux limites de nos connaissances. Heureusement, nous n'avons plus à redouter la peine de mort !

Le Soleil est une étoile comme les autres, mais c'est *notre* étoile et, de ce fait, elle est beaucoup plus proche et beaucoup plus claire que toutes les autres. Sans ce géant incandescent, notre Lune et nos planètes seraient méconnaissables, car elles n'émettent pas de lumière, elles se bornent à refléter celle du Soleil. Celui-ci est si imposant qu'il représente plus de 99 % de la masse de notre

système solaire. Sa force d'attraction assure la cohésion de notre système planétaire et ce que nous savons des étoiles et de la gravitation, nous le devons au premier chef à notre système solaire.

Le Soleil est une énorme et terrifiante boule de gaz brûlante au sein de laquelle se produisent des réactions de fusion nucléaire. Son carburant, c'est l'hydrogène, qui constitue l'essentiel de sa composition. Lors des réactions de fusion, cet élément léger est transformé en hélium. Au cœur du noyau solaire règne une température inimaginable de 15 millions de degrés Celsius. Mais à la surface du Soleil, il fait tout de même encore 5 500 degrés. En fin de compte, le rayonnement de cette chaleur est la source de toute notre énergie sur terre et il ne pourrait se produire sans la pesanteur et la pression élevée qui en résulte à l'intérieur du Soleil. En l'absence de lumière solaire, les plantes ne pourraient croître : elles tirent leur énergie de la photosynthèse. Notre nourriture aussi, nous la devons au Soleil, que nous soyons végans, végétariens ou que nous mangions de la viande, car les animaux se repaissent eux aussi de plantes.

En brûlant du bois, on brûle de l'énergie solaire. Pétrole, gaz et charbon sont des vestiges de processus biologiques datant des premiers temps de la Terre – de l'énergie solaire stockée, donc. Cependant nous détruisons toutes nos réserves en un temps record et accablons le climat de substances et d'énergie qui ont mis des années à se constituer. Pas besoin d'être climatologue pour comprendre que cela ne produira rien de bon à la longue.

Sans le Soleil, nous ne pourrions pas non plus produire d'électricité. L'effet photovoltaïque n'aurait jamais été découvert, cela va de soi. Mais il y a aussi les centrales hydroélectriques, qui ne fonctionnent que parce que le Soleil fait constamment s'évaporer de l'eau et que la pluie remplit nos océans et nos fleuves. Même les éoliennes ne sont exploitables que parce que le Soleil réchauffe notre atmosphère, produisant ainsi des différences de température selon les régions, qui favorisent les vents. Seules les usines marémotrices tirent leur énergie de la Lune et les centrales nucléaires d'éléments produits dans l'espace lors de la naissance de trous noirs et d'étoiles à neutrons. Cela dit, ces derniers ne nous sont parvenus que par la force de gravitation du Soleil. Mais au bout du compte, toute l'énergie, qu'elle vienne du Soleil, de la Lune, des étoiles ou des éléments, est issue du Big Bang, l'énergie originelle de l'univers.

Le Soleil a également favorisé l'évolution qui a fait de nous des bipèdes doués de pensée abstraite. Ses particules cosmiques qui bombardent la Terre accélèrent les taux de mutation au sein des cellules des organismes. De ce fait, c'est également au Soleil que nous devons leur développement, les avancées de l'évolution, le fait que l'homme est issu de petits mammifères. D'une certaine manière, nous sommes des mutants cosmiques. Cependant des taux de mutation plus élevés peuvent conduire à l'apparition de cancers et donc avoir des conséquences mortelles. C'est aussi au travers de ces maux que notre nature d'êtres humains s'est forgée.

Mais sans ces transformations génétiques potentiellement dangereuses, nous serions restés des organismes unicellulaires.

Comparé à d'autres étoiles turbulentes, le Soleil est d'un tempérament plutôt paisible. En fait, c'est une étoile moyenne<sup>13</sup> – ni particulièrement grande, ni particulièrement lourde, ni particulièrement active. Avec ses 4,6 milliards d'années, il est d'ailleurs dans la fleur de l'âge. Rapporté à sa masse totale, son réacteur à fusion nucléaire interne tourne même au ralenti. L'énergie qu'il produit par unité de volume est très inférieure à celle du métabolisme humain. Notre corps est une machine bien entraînée, qui fonctionne en permanence à plein régime. Ensemble, serrés les uns contre les autres, nous formerions une petite étoile<sup>14</sup>.

Mais grâce à sa taille, le Soleil éclipe tout. Pour pouvoir produire autant d'énergie que lui, la population mondiale devrait être presque un million de milliards de fois plus nombreuse.

En pratique, le Soleil se brûle lui-même. La fusion de l'hydrogène en hélium convertit de la matière en énergie. Notre étoile s'allège ainsi d'environ 4 milliards de kilos par seconde. Au regard de la quantité d'énergie considérable qu'elle libère, elle ne consomme qu'une toute petite partie de sa propre masse, ce qui témoigne d'une incroyable efficacité. Aucune machine humaine n'a jusqu'à présent été capable de produire autant d'énergie avec aussi peu de combustible. Si notre corps était aussi efficace et économe que le Soleil, l'homme n'aurait besoin que de moins d'un demi-gramme de nourriture

durant toute sa vie. Dans l'univers, seuls les trous noirs surpassent les étoiles lorsqu'il s'agit de convertir efficacement de la masse en énergie.

Cependant la mauvaise nouvelle, c'est qu'un jour, le réservoir solaire sera vide. Refaire le plein n'est pas possible. Le feu solaire s'éteindra, ce qui, au plus tard à ce moment-là, entraînera la disparition de la vie sur terre. Mais ce n'est pas pour demain. La science donne encore cinq à six milliards d'années au Soleil. Nous avons amplement le temps d'investir dans des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques !

Des dieux dans le ciel -  
Le mystère des orbites planétaires

Lorsque nous quittons le Soleil et dirigeons notre regard vers les planètes qui tournent autour de lui, les minutes-lumière deviennent vite des heures-lumière. Ce sont les planètes qui nous permettent de comprendre la gravité et la façon dont nous sommes arrivés à notre conception moderne du monde. Les véhicules spatiaux construits par l'homme ont voyagé jusqu'aux planètes et même un peu plus loin. Tout ce qui se trouve au-delà de notre système solaire ne nous est accessible que par l'intermédiaire des télescopes.

Alors que Mercure, la planète la plus proche du Soleil, n'est qu'à une soixantaine de millions de kilomètres de lui, Neptune, la plus éloignée, décrit son orbite à une distance de 4,5 milliards de kilomètres, c'est-à-dire

4 heures-lumière. Sa révolution dure l'équivalent de 165 années terrestres. Pendant des millénaires, nos ancêtres ont observé les planètes en s'étonnant de leurs orbites à la fois régulières et irrégulières. Les étoiles fixes ont un emplacement stable sur la voûte céleste, pendant que nous tournons au milieu d'elles, mais les planètes paraissent errer parmi les étoiles. D'où leur nom : « planète » vient d'un terme grec signifiant « astre errant » ou en mouvement.

Dans notre ciel, toutes les planètes, ainsi que le Soleil et la Lune, se meuvent sur la même bande – comme s'il existait une piste pour les planètes. Cette bande de ciel invisible, nous l'appelons « écliptique », d'après un mot grec qui veut dire « disparaître », « cesser » ou « obscurité ». Cette notion renvoie aux éclipses solaires observables dans cette zone.

L'écliptique existe parce que la révolution des planètes autour du Soleil s'effectue sur un plan. Elles dessinent ainsi un disque virtuel de dimensions astronomiques. L'orbite terrestre s'inscrit elle aussi sur ce disque et, du fait que nous nous trouvons sur lui, il ne nous apparaît que comme une bande étroite au firmament, tel un vieux disque que l'on observe latéralement. Les planètes plus proches du Soleil tournent autour de lui plus rapidement que ne le fait la Terre. Autrement, leur force centrifuge ne pourrait compenser la gravité supérieure du Soleil. Plus nous sommes près du Soleil, plus nous sentons sa force d'attraction. Les planètes plus éloignées tournent plus lentement que la Terre parce que la gravité du Soleil y est plus faible. Si

elles étaient plus rapides, elles sortiraient de leur orbite autour du Soleil.

Vues de la Terre, les planètes paraissent donc décrire de curieux trajets par rapport au firmament des étoiles fixes. Elles sont comme des coureurs prenant le virage dans un stade où les athlètes placés à l'extérieur doivent parcourir une distance plus grande et seraient en outre nettement plus lents. Les planètes Mercure et Vénus sont les sprinteurs du couloir n° 1. Elles sont particulièrement rapides et se trouvent toujours à proximité du Soleil. C'est la raison pour laquelle on ne les voit que le matin et le soir – Vénus est l'étoile du soir et du matin qu'on discerne le plus fréquemment. Les grandes planètes sont les sportifs du dimanche, plus lents, qui courent sur le couloir extérieur et se font même régulièrement dépasser par notre Terre. De notre perspective, elles ont l'air de se déplacer à reculons, jusqu'à ce que la Terre les ait doublées et arrive tout à coup à leur rencontre de l'autre côté du stade solaire. De cet endroit, elles paraissent soudain se déplacer dans la direction inverse.

Il nous a fallu des millénaires pour découvrir tout cela. Les orbites de ces planètes visibles à l'œil nu que sont Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne nous sont très longtemps demeurées impénétrables. Rien d'étonnant à ce qu'elles aient forgé nos visions du monde et nos religions.

Bien longtemps avant qu'on ait compris les raisons de ces phénomènes cosmiques, l'astronomie servait à des fins très différentes. Dans toutes les contrées de la Terre, les hommes vénéraient tout naturellement les étoiles et

les phénomènes célestes, car les astres réglèrent la vie quotidienne ainsi que les cycles mensuels et annuels. Le Soleil commandait au jour, et l'heure de son lever et de son coucher déterminait le cours de l'année et les saisons. Les phases de la Lune marquent le déroulement du mois et, pour d'obscures raisons, correspondent à peu près au cycle de la femme. Soleil et Lune semblaient décider de la fécondité et des heurs et malheurs des hommes. Vouer un culte à ces puissances divines allait de soi.

### Les débuts de l'astronomie

Les premiers indices archéologiques d'une étude du ciel remontent à des dizaines de milliers d'années<sup>15</sup>. Après avoir compris comment se succédaient les jours, les nuits et les saisons, les observateurs du ciel établirent des calendriers. Dans un premier temps, ce fut le cycle lunaire qui servit d'horloge, par la suite ce découpage fut synchronisé avec la course du Soleil. Le célèbre disque de Nebra en offre un témoignage européen précoce. Cette plaque de bronze de plus de 3 700 ans est considérée comme la plus vieille représentation concrète du ciel<sup>16</sup>.

Ces connaissances, fruit de la sagacité humaine, ont été utilisées pour l'agriculture ou la navigation maritime, qui était autrefois une entreprise extrêmement aventureuse et risquée. Aujourd'hui, nous disposons de satellites de navigation, cependant les données de positionnement qu'ils fournissent restent fondamentalement tributaires

des observations astronomiques – non des étoiles, mais du rayonnement émis par de lointains trous noirs, qui nous servent désormais de repères cosmiques<sup>17</sup>.

Vers le troisième millénaire avant notre ère, en Mésopotamie (dont Babylone deviendra la capitale), des prêtres observaient régulièrement la position de la Lune et des planètes. Ils se servaient de la Lune pour établir le calendrier de leurs fêtes, mais aussi pour déterminer les périodes de récolte et de perception des impôts. Le mois administratif comptait trente jours et l'année trois cent soixante – le temps manquant était complété par des jours intercalaires. Ils utilisaient un système de numération sexagésimal (en base 60) et non décimal, comme le nôtre. Notre habitude de subdiviser la journée en deux fois douze heures et le cercle en 360 degrés remonte probablement aux Babyloniens.

Avec le développement de l'écriture cunéiforme, il était devenu possible de comparer des informations cosmologiques indépendamment du moment où les observations avaient lieu. À quoi vinrent s'ajouter, à partir du premier millénaire avant notre ère, un admirable programme d'observation et un développement spectaculaire des mathématiques. Stationnées entre le Tigre et l'Euphrate, des troupes de savants se consacraient exclusivement à des tâches de mesure et de calcul. On remplit ainsi des milliers de tablettes d'argile avec des données astronomiques. Par conséquent, l'analyse des phénomènes astronomiques n'était plus uniquement tributaire de la mémoire des individus et devenait accessible aux générations suivantes. Cela marqua le début de la préservation,

du stockage et de l'analyse de données, processus que l'on peut déjà qualifier de scientifique, même s'il servait essentiellement à des fins religieuses.

Pour les Mésopotamiens, l'univers était ordonné, mais également soumis à la volonté des dieux dont on pouvait déchiffrer les intentions grâce à la lecture des présages, dont par exemple l'apparition des planètes<sup>18</sup>. Lorsque les observateurs du ciel furent parvenus à calculer à l'avance les trajectoires des planètes, ils se servirent de leurs résultats pour tenter de prédire l'avenir. Des souverains se faisaient établir des horoscopes afin de déterminer quel était le moment le plus propice à leurs projets.

Je n'ai aucune peine à imaginer l'effet qu'ont pu produire sur les esprits ce nouvel art du calcul ainsi que la prévisibilité du mouvement des planètes. Ces résultats ont probablement inspiré à certains l'idée que le destin pouvait lui aussi être prédictible. Ces prémisses donnèrent naissance à l'astrologie babylonienne, qui allait influencer de nombreuses cultures. On trouve jusque dans la Bible, avec les Rois mages, un monument littéraire érigé en l'honneur des astrologues du Levant<sup>19</sup>. Il fallut des millénaires pour découvrir que l'astrologie reposait en fin de compte sur une hypothèse erronée : si l'on peut prévoir la trajectoire de quelques corps célestes, il n'en va pas de même pour l'existence humaine.

En Égypte, les crues du Nil, qui apportaient de l'amont du fleuve le limon fertile, déterminaient le rythme du temps. Pour les Égyptiens, le ciel s'expliquait par la mythologie. Le Soleil, en qui ils voyaient le dieu Râ, renaissait chaque jour, sortant de l'eau à l'est. Râ était le

pourvoyeur de la vie, celui qui maintenait tout en vie. Il traverse le ciel, se couche le soir à l'ouest, meurt et renaît le matin suivant – un cycle qui se reproduit sans fin.

Le ciel et la Terre se touchent à l'horizon : dans les temps anciens, l'homme qui regardait autour et au-dessus de lui devait être pénétré du sentiment que, sur sa planète, il vivait au milieu du cosmos. L'idée que la Terre était plate était alors très répandue, elle correspondait à un sentiment anthropocentrique de l'existence. Les Égyptiens croyaient à un cosmos comportant un monde supérieur et un monde inférieur. Les dieux étaient partout et veillaient à ce que l'édifice du monde demeure stable et bien ancré en lui-même : en bas régnait Geb, le dieu de la Terre ; en haut, Nout, la déesse du ciel. Nout était la mère de tous les astres. Entre la Terre et le ciel s'étendait le royaume de Chou, le dieu de l'air et de la lumière. Chou maintenait le ciel en haut et s'assurait qu'il ne tombe pas sur la Terre.

Les anciens Babyloniens se représentaient la masse terrestre comme un disque flottant sur l'océan. Les dieux vivaient dans le ciel et déterminaient le cours des astres. Le firmament surplombait la Terre comme une cloche à fromage. Cette conception du monde, qui a prévalu durant toute l'Antiquité, reflétait les connaissances scientifiques de l'époque.

Les Grecs croyaient eux aussi à un monde supérieur et à un monde inférieur. Ils se mirent à scruter le ciel avec une attention accrue, se plongèrent dans les mathématiques, notamment la géométrie, et combinèrent les données d'observation des Babyloniens et la géométrie

des Égyptiens. Dès le VI<sup>e</sup> siècle avant notre ère, certains philosophes grecs tels que Pythagore parvinrent à la conclusion que la Terre devait être ronde. Dans ses écrits, Platon (428/427-348/347) mentionne déjà que la Terre a la forme d'une boule.

Parmi les réalisations des sciences de la nature dans l'Antiquité qui, aujourd'hui encore, suscitent notre admiration, on mentionnera la mesure de la circonférence de la Terre par Eratosthène de Cyrène vers l'an 200 avant J.-C. Eratosthène fit mesurer l'angle de l'ombre à l'heure de midi dans deux villes égyptiennes très éloignées l'une de l'autre. Dans l'une des villes, le Soleil étant exactement au zénith, il n'y avait aucune ombre. Dans la deuxième ville, en revanche, il y en avait une. À cet endroit, la surface de la Terre semblait compter sept degrés d'inclinaison de plus. Comme Eratosthène avait effectué un calcul minutieux de la distance séparant les villes et qu'il connaissait à présent l'angle de l'ombre, il fut capable, en se fondant sur le degré de l'angle, de fournir une mesure relativement juste de la circonférence de la Terre – ce qui représentait pour l'époque un exploit étonnant. Le Moyen Âge européen et les débuts de l'époque moderne perpétuèrent l'idée que la Terre était ronde – ainsi qu'on l'enseignait à l'université<sup>20</sup>. On a prétendu que les esprits cultivés contemporains de Christophe Colomb croyaient encore que la Terre était un disque. C'est une fable, comme bien des choses qu'on continue de raconter aujourd'hui sur le prétendu obscurantisme du Moyen Âge<sup>21</sup>.

En ce temps-là, toutefois, on n'aurait pu convaincre les souverains ou les populations que la Terre ne constituait pas le centre du cosmos. De mémoire d'homme, l'univers avait toujours été le siège des dieux et des planètes. Chez les Babyloniens, même la répartition des jours de la semaine renvoyait aux sept corps célestes que nous distinguons à l'œil nu : le Soleil, la Lune et les cinq planètes claires. Les Romains les rebaptisèrent d'après leurs dieux : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne. Tous ces noms sont issus du panthéon romain. Les noms que nous avons donnés aux jours de la semaine en sont dérivés – avec les différences inhérentes aux langues européennes concernées<sup>22</sup>.

Les philosophes grecs exercèrent une influence très durable sur notre conception du monde, puissamment soutenus par l'autorité presque écrasante d'Aristote (384-322 av. J.-C.), qui, de l'Antiquité jusqu'à un âge avancé de l'époque chrétienne, fut considéré comme « le philosophe ». Son influence était si considérable que toute autre théorie que la sienne paraissait absurde. Aristote n'était pas astronome et sa conception du monde était relativement simple. Par la suite, elle fut élargie par d'importants astronomes de l'Antiquité tardive, tels que Hipparque (v. 190-v. 120 av. J.-C.) et Claude Ptolémée (v. 100-v. 168). Dans ces théories, la Terre continuait de former le centre du cosmos. Les planètes et les étoiles tournaient sur les sphères célestes autour d'un centre : la Terre. Ptolémée réunit l'ensemble des connaissances de l'astronomie antique dans un traité en treize volumes, l'*Almageste*, contribuant ainsi à asseoir la

vision du monde ptoléméenne. Quelques savants isolés, comme Aristarque de Samos (310-230 av. J.-C.), avaient déjà défendu l'idée d'une conception héliocentrique du monde dans laquelle c'était le Soleil et non la Terre qui se situait au centre de l'univers. Cependant ce fut le système géocentrique qui s'imposa dans un premier temps.

### Une nouvelle conception du monde

Cette conception du monde perdura environ mille cinq cents ans – chose inimaginable pour nous. Elle fut reprise par d'excellents astronomes tant en Chine ancienne, en Inde<sup>23</sup> et dans le monde arabo-musulman que dans l'Europe chrétienne. Et ce jusqu'à ce que Nicolas Copernic et Johannes Kepler viennent la révolutionner. Ces deux théologiens versés dans les mathématiques s'étaient libérés de l'autorité des anciens philosophes.

Il y a deux ou trois ans, je suis allé en voyage professionnel à Pékin pour la 28<sup>e</sup> assemblée générale de l'Union astronomique internationale (UAI). Des milliers d'astronomes du monde entier étaient venus discuter des derniers résultats scientifiques et voter des résolutions, par exemple sur la dénomination de corps célestes. Un historien des sciences chinois nous fit un exposé historique sur l'astronomie en Chine. Cela faisait des milliers d'années que les astronomes chinois observaient le ciel et ils avaient disposé très tôt de moyens financiers importants. Ainsi s'était constitué au fil du temps un corpus de données d'observation d'une ampleur

impressionnante, qui continuait d'être utilisé de nos jours. L'astronomie chinoise avait été très en avance sur l'astronomie occidentale jusqu'aux XI<sup>e</sup> et XII<sup>e</sup> siècles de notre ère. Cependant, souligna l'historien, la Chine n'avait pas produit de savant possédant les compétences mathématiques d'un Copernic ou d'un Kepler. Les astronomes chinois n'avaient pas suffisamment tiré parti de leurs données.

« Pour quelle raison ? » demanda un auditeur. « C'était peut-être lié à leur conception du monde », répondit le conférencier. Car, si en Occident les philosophes avaient largement commencé à tenter de fournir des explications scientifiques aux mystères du ciel, en Chine on se plaçait principalement sur le terrain du surnaturel. Le monde était un organisme complexe, le ciel était rempli d'esprits et de créatures mythiques. Tout était entremêlé, à l'inverse du concept d'un Dieu et Créateur unique, lointain et omnipotent tel qu'il prévalait en Occident<sup>24</sup>. Cela n'avait aucun sens de s'interroger sur ce qui faisait mouvoir les étoiles. En Occident, au contraire, l'ancienne croyance en une multiplicité de dieux avait peu à peu cédé à la vision monothéiste judéo-chrétienne, même si la superstition, la croyance en la sorcellerie et l'astrologie n'avaient jamais complètement disparu.

Le judaïsme, déjà, faisait une très large part à l'argumentation rationnelle. L'interprétation de la Torah, l'enseignement divin, s'accompagne de discussions intenses, de démonstrations subtiles et de chaînes argumentatives logiques. Point intéressant, la vision astronomique du monde ne joue pas de rôle particulier dans

la tradition juive, à l'inverse de ce qui se passe dans d'autres religions. Elle ne s'en est pas moins développée sur l'arrière-fond des connaissances astronomiques de l'Orient de l'époque, entre Babylone, la Grèce et Rome, mais dans l'histoire de la Création, relatée dans la Genèse, le Soleil, la Lune et les étoiles sont réduits à de simples lumières. Ce récit grandiose, situé au tout début de l'Ancien Testament, retrace pas à pas la naissance de notre monde actuel au fil de plusieurs journées : au début apparaît la lumière, puis les eaux et le sec se rassemblent, et à la fin sont créés les plantes, les animaux et l'être humain. Les lumières célestes n'apparaissent pas au début de la Création mais – presque négligemment dévaluées – quelque part au milieu. Ce ne sont pas des créatures divines, elles ne sont là que pour indiquer le temps à l'homme. La Genèse décrit un monde désenchanté, extrêmement rationnel. Dans l'univers de la Bible, les miracles relèvent expressément de l'exception.

Dès lors, dans le système de valeurs judéo-chrétien, la nature n'a rien de surnaturel. Elle n'a pas de volonté propre, elle renvoie à un dieu unique, créateur et cause de toute chose, qui a été, est et sera toujours. Cette conception recèle déjà un fondement important des sciences modernes de la nature, à savoir la fiabilité des principes sur lesquels repose la nature. Sans cette hypothèse, les sciences de la nature n'auraient aucun sens.

Certes, on continue de prétendre qu'il existerait un éternel conflit entre la foi et la science, mais c'est un mythe<sup>25</sup> que l'âge de la sécularisation, depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, n'a eu de cesse de répandre. À l'heure actuelle, les historiens

ont une vision de la question beaucoup plus nuancée<sup>26</sup>. Les sciences ont longtemps fait partie de la théologie et ne constituaient pas des disciplines séparées. Les monastères du Moyen Âge étaient des havres de savoir et de transmission des connaissances ; les universités étaient créées avec la bénédiction de l'Église. Beaucoup de grands savants avaient été formés à la théologie, ils étaient profondément croyants et œuvraient souvent au service de l'Église. Cependant celle-ci revendiquait un monopole interprétatif dans tous les domaines scientifiques, ce qui fut la cause d'un nombre croissant de conflits aux xv<sup>e</sup> et xvi<sup>e</sup> siècles. Avec la Renaissance et la Réforme, la vision du monde et de l'homme avait radicalement changé, on pourrait aller jusqu'à parler d'une véritable révolution.

La révolution cosmologique débute en 1543 avec une première esquisse hardie – quoique pas complètement inédite – d'une nouvelle conception du monde par le chanoine prusso-polonais Nicolas Copernic. Dans ce système, le Soleil revient au centre du cosmos et la Terre tourne sur elle-même autour de son axe. Comme toutes les autres planètes, elle se déplace sur une orbite autour du Soleil. Mathématiquement parlant, c'était convaincant et novateur. Mais, chose déconcertante, cela supposait un univers de dimensions bien plus vastes qu'il n'était communément admis et une vitesse de rotation très élevée pour la Terre. Cette rotation vertigineuse n'aurait-elle pas dû se faire sentir d'une manière ou d'une autre ?

Cette nouvelle conception mit un certain temps à s'imposer. Les savants contemporains de Copernic,

qu'ils aient été au service de l'Église ou de souverains séculiers, avaient eux aussi de bonnes raisons de douter. L'influent astronome danois Tycho Brahe ne croyait pas en une mystérieuse et gigantesque force qui faisait tourner la Terre. Cependant il savait aussi que le modèle cosmologique ptoléméen ne pouvait pas être juste. Cet excellent observateur laissa derrière lui les informations déterminantes qui permirent par la suite au mathématicien, théologien et astronome allemand Johannes Kepler d'établir ses célèbres lois sur le mouvement planétaire. Kepler découvrit que les planètes décrivaient des ellipses et non des cercles autour du Soleil, et que plus une planète était proche du Soleil, plus sa révolution autour de lui était rapide. Pour Kepler, qui voulait déceler la beauté et l'harmonie divines dans le cosmos, l'élégance de ses équations mathématiques constituait également une découverte satisfaisante sur le plan théologique, car celles-ci étaient l'image de la fiabilité du Créateur, qui œuvrait tel un architecte.

Les mesures de Brahe dont il s'était servi furent sans doute les dernières grandes conquêtes que l'astronomie put faire sans l'aide d'un télescope. Celui-ci fut inventé au début du XVII<sup>e</sup> siècle par un astucieux lunetier de Middelburg<sup>27</sup>. Dans un premier temps, le télescope fut utilisé dans la navigation. Puis Galilée eut l'idée de s'en servir pour observer de nuit le ciel étoilé au-dessus de Padoue. Sa découverte, en 1609, des premières lunes de Jupiter déclencha de vifs débats en Italie et dans toute l'Europe. Pour l'Italien Galilée, cela confortait le modèle copernicien, car la rotation de ces lunes autour de Jupiter

montrait que les corps célestes ne tournaient pas tous autour de la Terre.

Le jeune savant ne tarde pas à s'affirmer avec une assurance accrue. Longtemps encouragées par l'Église catholique, ses thèses sont, dans un premier temps, discutées avec bienveillance parmi les jésuites. Cependant, dans ses publications, l'ambitieux Galilée passe sous silence les travaux de Kepler et continue de soutenir que les planètes décrivent des cercles. De ce fait, son modèle n'est pas à proprement parler en accord avec les meilleures données dont on disposait à l'époque. L'attitude bravache de Galilée, dont les propos mettent également en cause l'autorité du pape, irrite le chef de l'Église, qui pourtant était favorablement disposé à son égard. C'est aussi l'époque où les écrits de Copernic sont mis à l'Index et ne peuvent plus être publiés qu'avec un certain nombre de modifications. En 1632, c'est la confrontation avec l'Inquisition romaine. Galilée est assigné à résidence pour le restant de ses jours, mais continue d'être soutenu financièrement par l'évêque de Sienne. Comme il ne peut plus guère publier ses écrits en Italie, il les fait paraître ailleurs en Europe. Galilée était un bon rhétoricien, capable de rendre des résultats scientifiques accessibles à un lectorat de non-spécialistes. Il omit toutefois d'accorder aux travaux d'autres savants la considération qu'ils méritaient. À l'heure actuelle, il y a sur lui pléthore de légendes et d'histoires, mais elles ne résistent pas toutes à un examen historique attentif. On y trouve un grand nombre de projections rétrospectives sur sa personne et son époque<sup>28</sup>.

Il faudra encore deux cents ans après Kepler et Galilée pour que soient balayés les derniers arguments scientifiques qui contredisaient cette nouvelle conception du monde. Sa révision avait toutefois commencé depuis longtemps.

Pour ma part, je juge les découvertes de Kepler plus fondamentales. Kepler était l'exact opposé de Galilée : excellent mathématicien, chétif et de santé fragile, rongé par le doute, accablé par de multiples coups du sort. Sa mère fut accusée de sorcellerie par le bailli de Leonberg<sup>29</sup> et, lorsque sa femme mourut, il eut apparemment les plus grandes peines à trouver une autre épouse – il n'avait guère de succès auprès des femmes. Cependant ses trois lois forment aujourd'hui encore les bases de la mécanique céleste. Elles ont permis de mesurer la masse des étoiles et d'établir l'existence de la matière sombre. Lorsque j'explique les trous noirs à mes étudiants, je commence par mentionner la première loi de Kepler sur le mouvement des planètes autour du Soleil. Le mouvement de la matière autour d'un trou noir est presque similaire, mais beaucoup plus rapide.

En s'appuyant sur les lois képlériennes, le théologien<sup>30</sup> anglais Isaac Newton, savant de génie, parvint, une cinquantaine d'années plus tard, non seulement à fonder la mécanique classique mais aussi, grâce à sa loi de la gravitation, à expliquer la pesanteur terrestre, la révolution de la Lune et le mouvement des planètes autour du Soleil.

Dans la conception de Newton, la gravitation est une force universelle, de grande portée, qui amène les

masses à s'attirer indépendamment de leur constitution. Plus les masses sont loin les unes des autres, plus la force d'attraction est faible, mais elle ne disparaît jamais complètement. Cette force s'exerce dans l'univers entier, sur tous les corps – sur les planètes comme sur les pommes tombant des arbres, sur les marées ordinaires et sur les grandes marées advenant à la pleine lune. Le système solaire se trouvait ainsi presque entièrement expliqué. Presque.

Vénus, déesse de l'amour  
et mètre pliant de l'univers

La taille de l'univers et la distance des étoiles demeurèrent longtemps encore des questions essentielles. Quand la Terre tourne autour du Soleil, la position des étoiles dans le ciel ne devrait-elle pas se décaler ?

Ce décalage apparent de l'étoile, baptisé parallaxe, se produit lorsque l'étoile en question est observée depuis deux endroits situés à une grande distance l'un de l'autre. Chacun peut facilement vérifier ce phénomène : il suffit d'allonger le bras, de lever le pouce et de regarder celui-ci avec un œil, puis avec l'autre. Ces deux perspectives légèrement différentes nous donnent l'impression que notre pouce se balance. Plus nous rapprochons le bras, plus ce mouvement apparent gagne en amplitude. Si nous regardons un objet éloigné avec nos deux yeux, nous disposons d'une vision stéréoscopique et pouvons dès lors évaluer sa distance.

Ce qui est valable pour notre œil à petite échelle l'est également pour la trajectoire de la Terre autour du Soleil. Si je mesure la position d'une étoile une fois en été et une fois en hiver, lorsque la Terre se trouve successivement à gauche puis à droite du Soleil, cette étoile devrait, en fonction de son éloignement, se décaler vers la droite ou vers la gauche. Mais, à l'époque, on ne voyait rien de tel. Soit le modèle de Kepler et de Copernic était erroné, soit les étoiles étaient si éloignées que leur décalage était minimal et donc à peine discernable. Leur distance et par voie de conséquence la taille du cosmos visible dépendaient ainsi de la distance exacte entre la Terre et le Soleil. La détermination de cette distance devint un des grands défis de l'astronomie. Pour le résoudre, il fallait que les astronomes du monde entier se coordonnent alors que, dans le même temps, ils se faisaient tous concurrence.

Dans ce contexte, Vénus est devenue l'objet de nos aspirations. Nommée d'après la déesse romaine de l'amour et de la beauté, notre planète voisine est toutefois d'une chaleur torride et d'un attrait limité. La pression de son enveloppe de gaz à effet de serre nous écraserait. À la surface de Vénus, la pression est aussi élevée qu'à plus de 900 mètres de profondeur sous-marine et il y fait aussi chaud que sur une plaque de cuisson.

Cependant Vénus a rendu un service inestimable à l'astronomie moderne. Grâce à elle, on a pu mesurer très précisément la distance entre le Soleil et la Terre – qui constitue l'unité astronomique (UA) –, la taille du système solaire et même l'étendue de tout l'univers. À cet

effet, les scientifiques se sont servis de ce qu'on appelle le « transit de Vénus », à savoir le bref laps de temps pendant lequel Vénus passe devant le Soleil, comme dans une éclipse solaire mais en beaucoup plus petit. Ce phénomène n'est discernable que par des astronomes avertis.

Alors que la Lune, en raison de sa proximité avec la Terre, masque parfois presque complètement le Soleil, ce n'est pas le cas de Vénus, bien plus éloignée. Lorsqu'elle passe en quelques heures devant la boule ardente du Soleil, on ne discerne qu'une petite tache à peine visible. C'est la raison pour laquelle nous avons mis très longtemps à le percevoir.

Au XVII<sup>e</sup> siècle, Johannes Kepler avait déjà émis l'hypothèse de ces passages pour Mercure et Vénus, les deux planètes situées à l'intérieur de l'orbite de la Terre. Cependant il n'eut pas la possibilité d'en vérifier la justesse, car il mourut avant le transit de Vénus suivant, qui eut lieu en 1631.

La trace de l'ombre de Vénus sur le Soleil est fonction du point d'observation sur la Terre et de la distance au Soleil. Si, sur la Terre, on se déplace vers le sud, l'ombre se déplace vers le nord parce qu'on la voit sous un autre angle. À partir de la mesure temporelle du passage de Vénus effectuée en divers points de la Terre, on a pu, avec l'aide des lois de Kepler, calculer la distance entre la Terre et le Soleil – une idée de génie. Seul hic : le transit de Vénus est un phénomène astronomique extrêmement rare. Cela tient essentiellement au fait que les orbites de Vénus et de la Terre sont légèrement inclinées l'une par

rapport à l'autre. Même lorsque Vénus, vue de la Terre, se trouve dans la même direction que le Soleil, elle peut également passer au-dessus ou au-dessous du disque solaire. Le transit de Vénus ne se produit que quatre fois en deux cent quarante-trois ans et ce de manière couplée. Les derniers datent de 2012 et 2004, et antérieurement, de 1882 et 1874.

Si la situation se présentait favorablement, il ne fallait pas manquer le passage. Les astronomes de nombreux pays se rendaient alors en divers points du monde afin de suivre la trace de Vénus depuis tous les angles de vue. D'une certaine manière, ils ont été les précurseurs de nos expéditions modernes d'observation des trous noirs. À l'époque, ce genre d'entreprise était tout sauf un jeu d'enfant. Certaines échouaient presque à domicile. C'est ainsi qu'en Angleterre, Jeremiah Horrocks faillit manquer le passage de Vénus du 4 décembre 1639. Il avait commencé par attendre à côté de son télescope, qu'il avait braqué sur le Soleil. Puis, ne voyant rien venir, il avait quitté son poste d'observation, probablement pour assister à un office religieux. À son retour, il était presque trop tard. Le transit avait commencé depuis longtemps et Vénus se trouvait déjà devant le disque du Soleil. Horrocks ne put faire qu'une estimation de sa durée totale.

Aussi, lors des passages suivants en 1761 et 1769, les savants voulurent-ils se livrer à des observations plus précises et dépêchèrent-ils plusieurs expéditions internationales. Mais là encore, rien ne fut simple. Ce fut Guillaume Le Gentil, lequel voulait observer le transit

depuis l'Inde, qui connut l'échec le plus retentissant. Lorsque son navire arriva à Pondichéry, au sud-est du pays, les Anglais s'étaient emparés de la ville. Ne pouvant débarquer, le Français effectua ses mesures à bord. Cependant une barque oscillant sur l'eau n'est pas l'endroit idéal pour procéder à des mesures astronomiques précises. Le résultat fut inexploitable. Le Gentil décida d'attendre le transit suivant, qui devait avoir lieu huit ans plus tard, mais à l'approche du grand moment, le ciel se couvre. En astronomie, il faut aussi avoir la météo de son côté à l'instant décisif. Tout le monde n'a pas cette chance. Lorsque, après de nombreuses années passées à l'étranger, le Français prend enfin le chemin du retour, il tombe malade et manque mourir de la dysenterie. Arrivé en France, il découvre que sa famille l'a déclaré mort depuis longtemps et s'est partagé ses biens. Quant à son poste à l'Académie des sciences, il a été attribué à un autre.

Quoi qu'il en soit, la communauté scientifique parvint tout de même à un résultat exploitable concernant la distance de la Terre au Soleil. La valeur de l'unité astronomique telle qu'elle fut établie n'accusait qu'un écart d'environ 1,5 % avec la valeur actuelle, 149 597 870 700 mètres.

Ce n'est qu'en 1839 que l'astronome allemand Friedrich Bessel réussit pour la première fois à déterminer la distance exacte de la Terre à l'étoile 61 Cygni à l'aide de la parallaxe et de l'unité astronomique. Le décalage de l'étoile dans le ciel, que Bessel mesura sur une durée de six mois, se chiffrait à quelque 0,3 seconde

d'arc, ce qui équivalait à l'épaisseur d'un cheveu à une distance de 50 mètres. Il put alors calculer la distance où se trouvait l'étoile à l'aide d'une simple formule de trigonométrie et de l'unité astronomique : cent mille milliards de kilomètres, c'est-à-dire 11,4 années-lumière. Bessel constata avec étonnement que la lumière stellaire qu'il avait mesurée était en route vers la Terre depuis plus d'une décennie. Cette mesure eut définitivement raison de la dernière objection qui subsistait contre le modèle héliocentrique.

Comme, en astronomie, presque toutes les distances dépendent de la parallaxe, les astronomes ont introduit en son honneur une unité de longueur spécifique : le parsec. Ce terme est la contraction de « parallaxe-seconde » et correspond à la distance par rapport à la Terre d'une étoile qui aurait une parallaxe de 1 seconde d'arc, c'est-à-dire à peu près 3,26 années-lumière. Le parsec n'est donc pas une mesure de temps, contrairement à ce que laisseraient croire certains des films de la série *La Guerre des étoiles*<sup>31</sup>, mais une mesure de longueur.

Notre étoile voisine suivante est Proxima du Centaure, déjà située à 4,2 années-lumière, à savoir 1,3 parsec. Il n'y a donc aucune autre étoile dans un rayon inférieur à 1 parsec du Soleil. Grâce à la sonde spatiale européenne Gaïa, on peut aujourd'hui mesurer les parallaxes de presque deux milliards d'étoiles dans notre Voie lactée jusqu'à une distance de quelques milliers d'années-lumière. Avec les réseaux mondiaux de radio-télescopes, cela va même pour quelques étoiles et nuages

interstellaires jusqu'à plus de 60 000 années-lumière de l'autre côté de la Voie lactée<sup>32</sup>.

Si, aujourd'hui, des satellites se déplacent dans le système solaire avec une assurance en apparence somnambulique ou que des astronomes effectuent des mesures de l'univers, nous devons aussi ces succès aux expéditions astronomiques menées entre le XVII<sup>e</sup> et le XIX<sup>e</sup> siècle qui s'attachèrent, avec les premiers télescopes et en mettant en œuvre des idées hardies, à explorer notre système solaire. Aucun de ces astronomes n'est parti seul. Le ciel est notre propriété à tous et, parfois, on a besoin du monde entier pour l'étudier. Collaboration internationale et concurrence sont inhérentes à l'astronomie. Depuis les premiers astrologues de l'Orient aux temps bibliques jusqu'aux tentatives pour capter des ondes gravitationnelles ou des images radio de trous noirs en passant par l'exploration du système solaire et les expéditions pour observer le transit de Vénus, les astronomes ont toujours travaillé en collaboration et en concurrence pour découvrir et mesurer le ciel.



DEUXIÈME PARTIE

## **LES SECRETS DE L'UNIVERS**

• • •

Un voyage à travers notre univers actuel  
et l'histoire de l'astronomie  
et de la radioastronomie modernes :  
la révolution produite par la théorie de la relativité,  
la naissance des étoiles et des trous noirs,  
le mystère des quasars, l'expansion de l'univers  
et la découverte du Big Bang



## CHAPITRE 1

# LA PENSÉE LA PLUS HEUREUSE D'EINSTEIN

### Lumière et temps

Le Soleil est la lumière la plus claire de notre ciel, et la taille de notre système solaire est notre référence de base dans l'univers. Au sein du système solaire, nous mesurons les distances en secondes-lumière de la Terre à la Lune, en minutes-lumière de la Terre au Soleil et en heures-lumière de la Terre jusqu'aux planètes extérieures. Cependant, même dans notre quotidien, nous mesurons les distances à l'aide de la lumière. Jusqu'en 1966, l'unité de longueur était définie par le mètre-étalon. Il s'agissait d'une barre en platine iridié, installée à Paris, qui servait de mesure de référence. Le mètre-étalon correspondait au dix-millionième du quart de la circonférence terrestre, soit la distance séparant le pôle Nord de l'équateur en passant par Paris. Dans ces conditions, personne ne s'étonnera que les Anglais se soient toujours fermement refusés à introduire chez eux le système métrique. Aujourd'hui, toutefois, le mètre est défini à partir de la vitesse de la lumière, il correspond à la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le

vide en  $1/299\,792\,458$  de seconde. Pourquoi a-t-on choisi ce chiffre bizarre ? En fait, il correspond exactement au mètre-étalon parisien, mais n'est plus une question de fierté nationale. Par conséquent, quand on utilise un mètre gradué, en réalité on mesure en unités de lumière.

Nous nous servons aussi de la lumière pour mesurer le temps, car elle est formée d'ondes électromagnétiques. La lumière constitue donc une mesure fondamentale des choses et ceci est vrai dans une acception plus profonde. Einstein s'est interrogé sur la signification du fait que la lumière se déplace toujours à la même vitesse, quelle que soit la vitesse à laquelle soi-même on se trouve. Ce raisonnement allait bouleverser toutes nos représentations du caractère invariable et absolu de l'espace et du temps.

Mais comment la lumière peut-elle avoir toujours la même vitesse ? Une fourmi marchant dans une voiture de sport en mouvement se déplace plus vite qu'une fourmi se promenant sur l'asphalte, car la vitesse du véhicule et celle de la fourmi s'additionnent. Ne devrait-il pas en être de même avec la lumière ? Non, car la lumière n'est pas une fourmi, une voiture, un ballon de football, une fusée. La lumière est de l'énergie pure – et la lumière n'a pas de masse inerte. La matière ne peut être accélérée que par la force et l'énergie. Mais plus une chose est légère, plus il est facile de l'accélérer. Il est plus facile d'accélérer le mouvement d'une fourmi que celui d'une voiture. La lumière est si « légère » qu'il n'est même pas nécessaire de lui donner une bourrade, elle démarre d'elle-même. Ce faisant, dans le vide elle conserve toujours la vitesse

maximale, à savoir la vitesse de la lumière – à peu de chose près un milliard de kilomètres heure.

Rien ne peut se déplacer plus vite que la lumière, car il ne peut rien y avoir de moins inerte. Même les variations de la gravité et les ondes gravitationnelles qui en résultent ne peuvent se propager qu'à la vitesse de la lumière. Ce qui, au début, était la vitesse de la lumière est devenu entre-temps une vitesse de causalité. Lorsque nous parlons ici de « lumière », nous incluons souvent tacitement d'autres processus, qui, à l'instar de la lumière, transmettent des informations par le biais d'ondes.

Cependant il doit bien y avoir quelque chose qui change quand on se déplace par rapport à la lumière ? Le temps et l'espace varient, affirmait Einstein. Le temps et l'espace existent-ils indépendamment de tout le reste ? Je répondrais par la négative. À l'inverse de l'énergie et de la matière, le temps et l'espace ne sont que des concepts abstraits dans une description du monde. Ils ne sont pas tangibles. Ils ne deviennent une réalité physique que parce qu'on les mesure<sup>1</sup>, ce que l'on fait, en fin de compte, toujours par le biais de la lumière ou d'ondes comparables. La mesure de la réalité dans l'univers et sur la Terre est la lumière. Ce n'est pas seulement une mesure, c'est aussi ce qui définit à proprement parler l'espace et le temps.

Dans le récit biblique de la Genèse, la première chose qui apparaît, c'est la lumière – c'est ainsi qu'est créé le jour. Dans le récit scientifique que nous faisons aujourd'hui de la création, la lumière se trouve également

au commencement du temps – et au commencement de l'univers, il y a une boule ardente de lumière et de matière.

Mais pourquoi la lumière est-elle si fondamentale ? L'univers n'est pas constitué que de lumière, il est aussi fait de matière ! Cependant en creusant, on comprend qu'au fond tout est lumière et énergie. La célèbre formule d'Einstein

$$E = mc^2$$

signifie que l'énergie ( $E$ ) est égale à la masse ( $m$ ) multipliée par la vitesse de la lumière ( $c$ ) au carré. Toute masse est également énergie, toute énergie est également masse. En principe, il existe pour cette équation une autre variante, à savoir

$$E = h\nu$$

dans laquelle la lettre grecque  $\nu$  (nu) représente la fréquence de la lumière et  $h$  la constante de Planck, qui traduit la lumière en énergie. C'est l'équation la plus simple de la théorie des quanta dont le fondateur est le physicien allemand Max Planck. À très petite échelle, par exemple dans les atomes, l'énergie sous forme de lumière ne peut être donnée, ou plus exactement reçue, qu'en unités d'énergie déterminées, à savoir les quanta lumineux.

La lumière est donc aussi de l'énergie. Plus la fréquence est élevée, plus la quantité d'énergie est grande. La matière et la lumière sont de l'énergie et peuvent ainsi se transformer l'une en l'autre.

Pour ajouter à la perplexité, Einstein a découvert que lorsque les quantités d'énergie sont très importantes, la lumière se comporte parfois comme une particule. Nous parlons alors de *photons*, paquets d'ondes dans lesquels la lumière continue d'osciller mais qui volent en bourdonnant dans l'espace comme de petits paquets de lumière.

Newton et Maxwell avaient donc tous les deux raison : la lumière est à la fois particule *et* onde – cela dépend de ce que l'on cherche. Ici, la question détermine la réponse ! Aujourd'hui, on sait que cette dualité onde/corpuscule vaut également pour les plus infimes particules de matière. À toute petite échelle, même la matière se comporte parfois comme une onde.

Les forces à l'œuvre dans la vie quotidienne sont elles aussi transmises par la lumière. Ce qui assure la cohésion des atomes et des molécules, ce sont la physique quantique et les forces électromagnétiques – autrement dit les mêmes champs de force dont est constituée la lumière. Dans la théorie des quanta, toutes ces forces sont transmises par les échanges de particules de lumière virtuelles. Quand on se touche ou qu'on tape sur un clou avec un marteau, au niveau le plus infime, cette interaction est également transmise par des forces électromagnétiques. Les ondes sonores se propagent parce que du gaz a été comprimé et que des ondes de choc se déplacent dans l'air. Mais quand les molécules d'air se rencontrent et se repoussent dans du gaz, elles échangent à nouveau d'infimes particules de lumière virtuelles. Tout ce que nous éprouvons, mesurons, percevons ou modifions est, en fin de compte, le fruit de

propriétés de la lumière. À l'échelle la plus petite, celle de l'atome, tous nos sens reposent sur les échanges de lumière – c'est le cas pour la vue, mais aussi pour le toucher, le goût et l'odorat. Voilà pourquoi aucune information ne peut me parvenir à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

Nous mesurons donc toujours à l'aide de la lumière et seul existe pour moi ce que je peux mesurer. Dès lors, un univers sans lumière n'existerait pas. L'espace et le temps, la matière et les sens – au fond, tous ne sont rien sans la lumière<sup>2</sup>.

L'importance de la mesure dans la définition de la réalité est une découverte qui traverse toute la physique du xx<sup>e</sup> siècle. C'est – aujourd'hui encore – une révolution radicale de la pensée, elle détermine la théorie de la relativité ainsi que la physique quantique. Car il en va de même dans la physique quantique : ce n'est que lorsque je *mesure* quelque chose que ce quelque chose devient réalité. Tout le reste relève de l'interprétation, or celle-ci précisément fait débat dans la physique quantique<sup>3</sup>, tout comme la question de ce que signifie réellement mesurer. Mesurer englobe toujours des processus au cours desquels des particules se livrent à des échanges de forces et de lumière. Ce mode de pensée conduit à des façons de voir entièrement nouvelles. Dans la physique quantique, une particule peut, avec une certaine probabilité, être partout – jusqu'à ce qu'elle soit mesurée. Dans l'obscurité du néant, tout est possible, jusqu'à ce que quelqu'un fasse la lumière. Mesurer signifie, par exemple, éclairer un processus quantique. Comme nous

travaillons au niveau atomique, essayer de mesurer les particules signifie toujours aussi les influencer, les modifier et les fixer par l'intermédiaire des quanta lumineux. La mesure ne définit pas seulement la réalité, elle la modifie également.

C'est ce qu'Erwin Schrödinger a décrit dans son célèbre paradoxe. Pour ce faire, il a imaginé un chat dans une boîte à chaussures fermée. Tant que personne ne soulève le couvercle et ne regarde à l'intérieur, le chat est à la fois mort *et* vivant. L'image de Schrödinger est évidemment un peu trompeuse, car le chat dans la boîte n'est pas un objet quantique seul, isolé. Ses particules échangent en permanence des photons virtuels, entre elles et avec le sol ou l'air. Le chat est donc déjà continuellement mesuré ou se mesure déjà lui-même – ce qui établit son état<sup>4</sup>. Cela ne survient pas uniquement au moment où l'on soulève le couvercle. Mais ce n'est qu'une image – indépendamment du fait qu'aujourd'hui, plus personne n'enfermerait un malheureux chat dans un carton pour le faire mourir, ne fût-ce que de façon hypothétique. Il aurait à juste titre maille à partir avec les associations de protection des animaux !

Un chat véritable est mort *ou* vivant, mais pas les deux. Cependant si le chat était un électron isolé dans l'espace vide, très éloigné de toute autre matière, alors en substance cet énoncé serait juste. L'électron ne serait pas ici ou là mais, avec une certaine probabilité – parfois infime –, partout et nulle part à la fois dans l'univers. Ce n'est que lorsque le chat électron est atteint par un rayon lumineux que ce rayon le fixe en un endroit

déterminé, et c'est à cet instant précis qu'il ne se trouve plus partout dans l'univers. Des électrons peuvent franchir deux portes en même temps, à moins qu'on installe dans les portes un barrage optique mesurant leur franchissement : dans ce cas, ils n'en franchissent toujours qu'une seule.

Voilà qui met une fois de plus en évidence l'importance étonnante et unique de la lumière. Celle-ci crée la réalité, parce qu'elle transmet de l'information. Même le temps et l'espace trouvent leur origine dans la lumière et la matière. Le temps et l'espace sont des concepts abstraits qui ne deviennent réels que lorsque je chiffre le temps ou que je mesure l'espace. Sans montre il n'y a pas de temps, sans règle, pas d'espace. L'instrument de mesure le plus élémentaire de l'espace et du temps, c'est la lumière. Ce n'est que par la mesurabilité que l'espace acquiert des propriétés physiques, que nous décrivons dans des modèles et des systèmes.

Mais si la lumière se déplace toujours à la même vitesse par rapport à *chaque* observateur, alors il doit y avoir autre chose qui change pour ledit observateur, à savoir l'espace et le temps. Albert Einstein l'a montré au moyen d'expériences de pensée très simples et en a tiré la conclusion suivante : l'espace et le temps ne sont pas des grandeurs absolues, comme elles l'étaient encore chez Newton, qui demeurent inchangées – elles ne sont que relatives. Seule est absolue la vitesse de la lumière<sup>5</sup>.

Si une voiture se dirige vers moi, par exemple, à l'intérieur du véhicule le temps semble passer autrement que pour moi ! Cela paraît bizarre, et ça l'est effectivement,

mais il ne saurait en être autrement si l'on prend en compte la constance de la vitesse de la lumière.

Pensons à la manière la plus fondamentale de mesurer le temps. Le tic-tac des montres-bracelets mécaniques s'effectue à une fréquence fixe, déterminée par un volant. Ce tic-tac régulier mesure le temps seconde par seconde. Il nous suffit de compter le nombre de tic-tac pour savoir combien de temps s'est écoulé. L'aiguille se charge aimablement du comptage à notre place, si bien que nous pouvons nous contenter de consulter le cadran.

La montre électronique fonctionne sur le même principe, sauf que là c'est un cristal qui oscille. Mais peu importe – au bout du compte, c'est-à-dire à l'échelle la plus petite, l'échelle atomique, la transmission d'énergie se fait aussi par le biais des forces électromagnétiques : il y a un échange de photons virtuels. Même le sablier est soumis aux forces de la lumière quand les molécules de sable se repoussent et essaient de se frayer un passage dans l'étroit goulot.

Pour faire simple, construisons donc une horloge dans laquelle ce n'est pas un poids qui va et vient, mais de la lumière entre deux miroirs. Dans le cas d'une distance fixe de quinze centimètres, la lumière met environ une nanoseconde à effectuer l'aller-retour. Je mesure donc un milliard de tic-tac lumineux par seconde. La fréquence correspondante s'appelle gigahertz, abrégé en GHz. Un hertz représente une oscillation par seconde. Cette unité a été baptisée d'après Heinrich Hertz, professeur de physique à Bonn, qui, le premier, a produit et mesuré les

ondes électromagnétiques dont l'existence avait été prédite par Maxwell.

Et maintenant le point décisif : supposons que je sois assis en voiture avec cette horloge lumineuse, la lumière se déplace à la verticale entre les deux miroirs. Mais si un policier qui se trouve sur le bord de la route observe attentivement le véhicule qui passe devant lui à grande vitesse, il a l'impression que la trajectoire de la lumière entre les miroirs est légèrement oblique. À ses yeux, la trace de la lumière ressemble à un zigzag. Pour que ce soit plus clair : imaginons que la lumière se meuve aussi lentement que la fourmi qui se déplace à la verticale, de bas en haut et inversement, dans la voiture. Le policier la voit à la fois grimper et se déplacer latéralement avec la voiture – par rapport à lui, elle se déplace à l'oblique et très rapidement.

Les lignes obliques du mouvement de la fourmi et de la lumière sont bien sûr plus longues que les lignes verticales. Pour le policier, la fourmi et la lumière effectuent plus de trajet dans le même laps de temps. Un observateur naïf penserait que la fourmi voyage à une survitesse de fourmi et, par voie de conséquence, que dans la voiture la lumière se déplace à une survitesse de la lumière. Admettons que ce soit vrai pour la fourmi. En revanche, Albert Einstein et James Maxwell ont interdit à la lumière cet « excès de vitesse ». Un policier respectueux des lois devrait donc voir le déplacement de la lumière à la même vitesse que le conducteur – même si la lumière, de son point d'observation, accomplit un trajet plus important.