



KIP S.  
**THORNE**

Prix Nobel de physique

Trous noirs  
et distorsions  
du temps

Préface de STEPHEN HAWKING

**Champs** sciences

**KIP S. THORNE**

**Trous noirs et distorsions  
du temps**

Kip S. Thorne a été l'un des acteurs privilégiés d'une quête grandiose consistant à comprendre l'héritage transmis par Einstein.

Pour nous faire vivre la captivante chronique des découvertes scientifiques prédites par la théorie de la relativité, il nous entraîne à travers un labyrinthe d'objets exotiques – naines blanches, étoiles à neutrons, ondes gravitationnelles, etc. –, dont les trous noirs sont peut-être les plus mystérieux de l'univers.

Jonglant avec les décennies, évoquant la multiplicité des collaborations scientifiques à l'échelle de la planète, montrant l'enchevêtrement de la recherche et de la guerre froide, Kip S. Thorne peint une fresque fascinante et contrastée, où se côtoient astrophysique, sociologie, physique et spéculations audacieuses.

Né en 1940, **Kip S. Thorne** est un physicien théoricien américain, connu pour ses contributions enrichissantes dans le domaine de la gravitation, de la physique et de l'astrophysique. Diplômé de Princeton, il a occupé la chaire Feynman de physique théorique de l'Institut de technologie de Californie.

Traduit de l'anglais par Alain Bouquet et Jean Kaplan.

En couverture: Représentation d'un trou noir  
© Science Photo Library/Jeremy Schnittman/  
NASA's Goddard Space Flight Center

**Flammarion**

TROUS NOIRS  
ET DISTORSIONS DU TEMPS



Kip S. Thorne

TROUS NOIRS  
ET DISTORSIONS  
DU TEMPS

L'héritage sulfureux d'Einstein

*Préface de Stephen Hawking*

*Traduit de l'anglais par  
Alain Bouquet et Jean Kaplan*

*Ouvrage traduit avec le concours  
du Centre National du Livre*

**Champs sciences**

La couverture de ce livre est un rendu artistique de l'apparence d'un trou noir entouré d'un disque d'accrétion ; cependant, ici, l'ombre noire du trou et l'obscurité de l'univers à l'arrière-plan sont dépeintes en jaune, tandis que le gaz chaud du disque est teint en marron foncé.

Les rayons lumineux provenant du disque sont gravitationnellement tordus par le trou noir, ce qui produit cette image conforme à la déduction du physicien français Jean-Pierre Luminet, formée pour la première fois en 1979, et rendue célèbre trente-cinq ans plus tard par le film *Interstellar*.

Kip S. Thorne

Titre original, *Black Holes and Times Warps*  
Éditeur original, W. W. Norton & Company, Inc., New York  
© 1994 by Kip S. Thorne  
© Flammarion, 1997 pour la traduction française  
© Flammarion, 2022.  
ISBN : 978-2-0802-6877-8

*Je dédie ce livre à*  
John Archibald Wheeler  
*mon mentor et ami*





# Préface

---

Ce livre traite d'une révolution dans notre conception de l'espace et du temps, et de ses conséquences remarquables, qui ne sont pas toutes élucidées. Écrit par un de ses principaux acteurs, c'est aussi une chronique fascinante des efforts difficiles qui menèrent à la compréhension des objets peut-être les plus mystérieux de l'Univers, les trous noirs.

Il était autrefois évident que la Terre était plate et qu'elle se continuait sans limites, à moins qu'elle n'ait un bord d'où vous risquiez de tomber si vous étiez assez inconscient pour voyager aussi loin. Le retour sain et sauf de Magellan<sup>1</sup> puis des autres voyageurs autour du globe finit par convaincre les gens que la surface de la Terre se refermait sur elle-même, qu'elle était sphérique. Mais on considérait toujours comme évident que cette sphère se trouvait dans un espace plat, plat en ce sens que les lois de la géométrie d'Euclide s'appliquaient : les parallèles ne se rencontreraient pas. Mais en 1915, Albert Einstein proposa une théorie qui combinait l'espace et le temps en quelque chose nommé

1. Magellan lui-même ne revint pas du premier voyage autour de la Terre, mais son lieutenant del Cano put confirmer que celle-ci était ronde, comme certains le savaient depuis 2 000 ans (*N.D.T.*).

l'espace-temps. Celui-ci n'était pas plat mais courbé par la matière et l'énergie qui s'y trouvaient. Comme l'espace-temps est presque parfaitement plat près de nous, cette courbure n'a guère d'importance dans les situations courantes. Mais les implications de cette théorie pour l'Univers plus lointain étaient beaucoup plus surprenantes qu'Einstein lui-même ne l'imaginait. L'une d'elles était que les étoiles pouvaient s'effondrer sous leur propre poids jusqu'à ce que l'espace autour d'elles devienne tellement courbé qu'il les isole du reste de l'Univers. Einstein lui-même ne croyait pas qu'un pareil effondrement soit possible, mais plusieurs personnes démontrèrent qu'il était une conséquence inévitable de sa théorie.

La façon dont elles s'y prirent, et comment elles découvrirent les étranges propriétés du trou noir que ces étoiles laissaient derrière elles, forme le sujet de ce livre. C'est l'histoire de l'émergence d'une découverte scientifique, écrite par l'un des participants, un peu comme le livre de James Watson *La Double Hélice* raconte la découverte de la structure de l'ADN qui conduisit à la compréhension du code génétique. Mais à la différence du cas de l'ADN, il n'y avait aucune indication expérimentale pour guider les enquêteurs. Au contraire, la théorie des trous noirs fut développée bien avant qu'il y ait le moindre indice de leur existence. Je ne connais pas d'autre exemple en science de réussite d'une extrapolation aussi extrême fondée sur la pensée pure. Cela montre la puissance et la profondeur remarquables de la théorie d'Einstein.

Nous ignorons encore beaucoup de choses, par exemple ce qui arrive aux objets ou à l'information qui tombent dans un trou noir. Ressortent-ils ailleurs dans l'Univers, ou dans un autre univers ? Pouvons-nous courber suffisamment l'espace et le temps pour voyager dans le passé ? Ces questions sont partie intégrante de notre quête pour comprendre l'Univers. Peut-être quelqu'un viendra-t-il du futur nous apporter la réponse.

STEPHEN HAWKING

# Introduction

---

Ce livre combine des principes physiques bien établis avec une imagination débridée, permettant à l'auteur de dépasser ce qui est aujourd'hui certain pour s'aventurer dans un domaine du monde physique qui n'a aucun équivalent dans notre vie quotidienne sur Terre. Son but est, entre autres, d'examiner l'intérieur et l'extérieur d'un trou noir, un corps céleste si dense que son champ de gravitation empêche la matière et la lumière de s'en échapper comme elles peuvent le faire d'une étoile telle que le Soleil. Les descriptions des événements vécus par un observateur s'approchant d'un trou noir sont fondées sur les prédictions de la relativité générale dans le domaine de la « gravité forte », où elle n'a jamais été vérifiée. Quant aux spéculations qui s'aventurent au-delà et s'intéressent à l'intérieur de ce que l'on appelle l'horizon du trou noir, elles font appel à une certaine forme d'audace, pour ne pas dire de bravoure, dont Kip Thorne et ses associés de tous les pays ne manquent pas, et qu'ils partagent avec le plus grand plaisir. Cela rappelle la boutade d'un physicien éminent : « Les cosmologistes sont souvent dans l'erreur mais jamais dans le doute. » On doit lire ce livre avec deux objectifs : apprendre certains faits solides concernant des aspects étranges, mais réels, de notre univers physique, et prendre plaisir aux spéculations savantes sur ce

qui pourrait se trouver au-delà de ce que nous connaissons avec quelque certitude.

En préface à cet ouvrage, il faut dire que la théorie de la relativité générale d'Einstein, une des plus grandes créations de la science spéculative, fut formulée voici trois quarts de siècle. Elle apporta une explication aux déviations du mouvement de la planète Mercure par rapport aux prédictions de la théorie de la gravitation de Newton, puis une interprétation des décalages vers le rouge des galaxies lointaines observés par Edwin Hubble et ses collègues à l'observatoire du mont Wilson. Ces triomphes des années 20 furent suivis d'une période de calme relatif pendant laquelle la communauté des physiciens se tourna vers la mécanique quantique, la physique nucléaire, la physique des particules et la cosmologie observationnelle.

Le concept de trou noir avait été proposé sous forme spéculative peu après la découverte par Newton de la théorie de la gravitation. A quelques modifications près, il trouvait une place naturelle dans la théorie de la relativité, si l'on voulait bien extrapoler les solutions des équations de base à des champs de gravitation aussi intenses, une procédure qu'Einstein considérait alors avec scepticisme. En utilisant la théorie, Subrahmanyan Chandrasekhar montra néanmoins en 1930 que les étoiles dont la masse dépassait une valeur critique, nommée depuis la masse de Chandrasekhar, devaient s'effondrer en ce que nous appelons des trous noirs dès qu'elles auraient épuisé les sources d'énergie nucléaire responsables de leur température élevée. Un peu plus tard, dans les années 30, ce travail fut développé par Fritz Zwicky, Robert Oppenheimer et leurs collègues, qui montrèrent qu'il existait un intervalle de masse où l'étoile s'effondrerait plutôt en une étoile à neutrons, un objet formé de neutrons fortement serrés. Dans les deux cas, l'implosion finale de l'étoile arrivée au terme de la combustion nucléaire devait s'accompagner d'un colossal dégagement d'énergie en très peu de temps, dégagement qu'ils associaient à la brillance des supernovae vues à l'occasion dans notre Galaxie comme dans les galaxies plus lointaines.

La Seconde Guerre mondiale interrompit ces travaux. Mais dans les années 50 et 60, la communauté scientifique les reprit avec une vigueur et un intérêt renouvelés sur le plan aussi bien théorique qu'expérimental. Trois progrès majeurs furent accomplis. D'abord les connaissances acquises en physique nucléaire et en physique des hautes énergies trouvèrent une application naturelle en cosmologie, fournissant la base de la théorie de la formation de

l'Univers que l'on nomme le big bang. Plusieurs chaînes de raisonnement convergent vers l'idée que l'univers que nous connaissons provient de l'expansion d'une « soupe » initialement chaude et dense de particules, souvent appelée boule de feu. Cet événement primordial eut lieu il y a dix ou vingt milliards d'années. La confirmation sans doute la plus spectaculaire de cette hypothèse fut la découverte des restes dégradés de la lumière qui accompagnait les dernières étapes de l'explosion initiale.

Le deuxième progrès fut l'observation effective d'étoiles à neutrons se comportant comme Zwicky et l'équipe d'Oppenheimer l'avaient prévu, ce qui donna plein crédit au concept selon lequel les supernovae sont associées aux étoiles qui subissent un effondrement gravitationnel terminal. Si des étoiles à neutrons existent dans un certain intervalle de masse, il n'est pas déraisonnable de conclure que des trous noirs seront produits par des étoiles plus massives. La preuve ne saurait être observée qu'indirectement, mais il se trouve qu'il existe aujourd'hui plusieurs de ces indices indirects.

Enfin, un certain nombre d'arguments sont venus renforcer la théorie de la relativité générale. Il s'agit de mesures très précises des orbites des sondes spatiales et des planètes dans le système solaire, et de l'observation de lentilles gravitationnelles dues à l'action de galaxies sur la lumière provenant de sources plus éloignées. Plus récemment, la perte d'énergie d'une paire d'étoiles en orbite l'une autour de l'autre a pu être attribuée avec une bonne certitude à l'émission d'ondes gravitationnelles, prédiction majeure de la théorie. De telles observations nous encouragent à croire les prédictions non testées de la relativité générale à proximité d'un trou noir, et ouvrent la voie aux spéculations pleines d'imagination comme celles qui sont présentées ici.

FREDERICK SEITZ



# Préface de l'auteur

---

*De quoi parle ce livre, et comment le lire.*

J'ai participé trente années durant à une quête grandiose, une quête pour comprendre l'héritage transmis aux générations futures par Albert Einstein, la théorie de la relativité générale et ses prédictions au sujet de l'Univers, et pour découvrir où et comment la relativité échoue et ce qui la remplace alors.

Cette quête m'a conduit à travers un labyrinthe d'objets exotiques : les trous noirs, les naines blanches, les étoiles à neutrons, les singularités, les ondes gravitationnelles, les trous de ver, les distorsions du temps et les machines à voyager dans le temps. Elle m'a appris l'épistémologie : pourquoi une théorie est-elle « bonne » ? Quels principes transcendants contrôlent les lois de la nature ? Pourquoi nous, les physiciens, pensons-nous connaître ce que nous pensons connaître, même si la technologie est trop rudimentaire pour nous permettre de tester nos prédictions ? Cette quête m'a montré comment fonctionnait le cerveau des physiciens, les énormes différences d'un cerveau à l'autre (par exemple entre celui de Stephen Hawking et le mien), et pourquoi il faut plusieurs types différents de savants, chacun travaillant à sa manière, pour donner corps à notre compréhension de l'Univers. Notre recherche, avec ses centaines de participants dispersés sur la Terre, m'a aidé à prendre conscience du caractère international de la

science, des diverses manières dont l'entreprise scientifique est organisée dans des sociétés différentes, enfin de l'enchevêtrement de la science et de la politique, en particulier à travers la rivalité soviéto-américaine.

Je tente dans cet ouvrage de partager ces aperçus avec des non-scientifiques et avec des scientifiques travaillant dans des domaines différents du mien. C'est un ouvrage où des thèmes se répondent les uns aux autres, reliés par le fil conducteur de l'histoire : l'histoire de nos efforts pour déchiffrer l'héritage d'Einstein, pour découvrir ses prédictions sulfureuses au sujet des trous noirs, des singularités, des ondes gravitationnelles, des trous de ver et des distorsions temporelles.

Le livre débute par un prologue, un récit de science-fiction qui introduit rapidement le lecteur aux concepts de la physique et de l'astrophysique. Certains pourront le trouver décourageant. Les concepts (trous noirs et horizons, trous de ver, forces de marée, singularités, ondes gravitationnelles) arrivent trop vite et sans trop d'explications. Mon conseil est de les laisser passer, de se régaler du récit, et d'en tirer une impression d'ensemble. Chaque concept sera ensuite réintroduit plus à loisir dans le corps du livre. Après l'avoir lu, retournez au prologue pour en apprécier les nuances techniques.

Le corps de l'ouvrage (chapitres I à XIV) a un ton très différent du prologue. La trame en est historique, et les divers thèmes du livre s'y mêlent. Je suis le cours de l'histoire pendant quelques pages avant de broder sur un thème puis sur un autre. Je reviens ensuite sur l'histoire avant de repartir sur un autre thème. Ces digressions, ces broderies, proposent au lecteur une élégante tapisserie d'idées entremêlées venant de la physique, de l'astrophysique, de la philosophie des sciences, de la sociologie des sciences et de la science dans l'arène politique.

Comme la physique peut être parfois un peu rude, un glossaire des concepts utilisés se trouve à la fin du livre.

La science est une entreprise communautaire, les aperçus qui forment notre vision de l'Univers ne viennent pas d'une seule personne, ni même de quelques-unes, mais des efforts conjoints de beaucoup de gens. Cet ouvrage présente donc de nombreux personnages, et, pour aider le lecteur à se souvenir de ceux qui apparaissent à plusieurs reprises, une liste les répertorie à la fin du livre, avec quelques mots à leur propos.

Dans la recherche scientifique comme dans la vie, la plupart des thèmes sont explorés simultanément par beaucoup de per-



sonnes différentes, et les percées accomplies au cours d'une décennie peuvent s'appuyer sur des idées très anciennes mais oubliées pendant fort longtemps. C'est pour cela que le livre saute sans cesse d'une époque à une autre, explorant un moment les années 60 avant de replonger dans les années 30 puis de rejoindre le thème principal dans les années 70. Le lecteur qui serait étourdi par tous ces voyages temporels peut se raccrocher à la chronologie qui se trouve en fin d'ouvrage.

Je n'ai pas cherché à être aussi complet, exact ou impartial qu'un historien pourrait l'exiger. Si j'avais voulu être complet, la plupart des lecteurs auraient déserté en chemin, épuisés comme moi-même. Si j'avais voulu être beaucoup plus exact, le livre serait rempli d'équations et serait illisible. Bien que j'aie tenté d'être impartial, j'ai certainement échoué car je suis trop proche de mon sujet : j'ai été impliqué personnellement dans son développement depuis les années 60, et certains de mes amis les plus proches y participent depuis les années 30. Je me suis efforcé de compenser mon parti pris grâce à de longs entretiens enregistrés avec d'autres participants à cette quête (voir la bibliographie) et en soumettant plusieurs chapitres à leurs critiques (voir les remerciements). Cependant, toute partialité ne saurait être totalement éliminée.

Pour aider le lecteur qui souhaiterait des informations plus complètes, plus exactes et plus impartiales, j'ai indiqué en note à la fin du livre la source de plusieurs des affirmations historiques du texte, ainsi que les références des articles techniques originaux que les participants à la quête ont écrits pour s'expliquer mutuellement leurs découvertes. Les notes contiennent aussi des discussions plus précises, et donc plus techniques, de certains points déformés dans le texte par souci de simplicité.

La mémoire est défaillante, et différentes personnes ayant vécu les mêmes événements en gardent un souvenir et une interprétation différents. J'ai évoqué en note ces points de divergence, et dans le texte j'ai présenté mon propre point de vue comme s'il était parole d'Évangile. Puissent les vrais historiens me pardonner, et les non-historiens me remercier.

John Wheeler, mon mentor et professeur dans mes années de formation de physicien, et un personnage central de ce livre, adore demander à ses amis : « Quelle est la chose la plus importante que vous avez apprise sur tel ou tel sujet ? » Peu de questions permettent mieux à l'esprit de se concentrer. Dans le même ordre d'idée, je me demande au terme d'une quinzaine d'années passées

(en petite partie) à écrire ce livre : « Quelle est la chose la plus importante que tu voudrais que tes lecteurs retiennent ? »

Ma réponse est l'incroyable puissance de l'esprit humain pour dénouer, parmi les faux départs, les impasses et les bouffées d'inspiration, la complexité de notre univers et en révéler la simplicité ultime, l'élégance et l'éclatante beauté des lois fondamentales qui le gouvernent.

KIP THORNE

# Prologue : Un voyage parmi les trous

---

*Où le lecteur, à travers un récit  
de science-fiction, rencontre les trous noirs  
et leurs étranges propriétés,  
telles que nous les comprenons  
dans les années 90.*

De tous les concepts forgés par l'esprit humain, des licornes et des gargouilles à la bombe à hydrogène, le plus fantastique est peut-être le trou noir : un trou dans l'espace avec un bord bien défini, dans lequel tout peut tomber et d'où rien ne peut s'échapper, un trou dans lequel la gravitation est si forte que la lumière elle-même est prisonnière de sa poigne, un trou qui courbe l'espace et déforme le temps <sup>1</sup>. Comme les licornes et les gargouilles, les trous noirs semblent davantage appartenir au royaume de la science-fiction ou des anciens mythes qu'à l'univers réel. Pourtant les lois les mieux vérifiées de la physique prédisent avec certitude que les trous noirs existent. Dans notre seule galaxie, il y en a peut-être des millions, mais leur obscurité les cache à notre vue et les astronomes ont les plus grandes difficultés à les trouver <sup>2</sup>.

## *Hadès*

Imaginez que vous êtes le propriétaire et le capitaine d'un grand vaisseau spatial, avec des ordinateurs, des robots et des centaines d'hommes sous vos ordres. Vous avez reçu mandat de la Société mondiale de géographie d'explorer les trous noirs dans les profondeurs de l'espace intersidéral, et de rendre compte de vos

1. Voir les chapitres III, VI et VII.

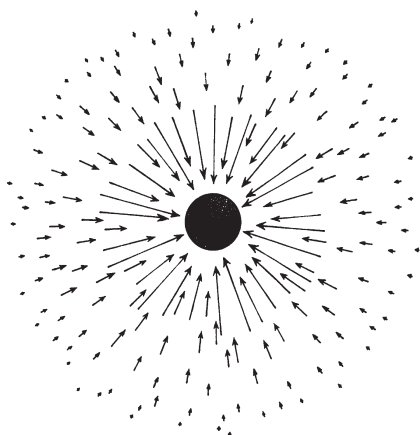
2. Voir le chapitre VIII.

découvertes par radio à la Terre. Après six ans de voyage, votre vaisseau ralentit au voisinage du trou noir le plus proche de la Terre, un trou noir baptisé « Hadès », à proximité de l'étoile Véga de la Lyre.

Sur l'écran vidéo, vous apercevez les marques de la présence du trou. Les atomes de gaz dispersés dans l'espace interstellaire, un tous les centimètres cubes à peu près, sont attirés par la gravité du trou (figure P.1). Ils convergent vers lui de toutes les directions, lentement quand ils en sont éloignés et que la gravité est faible, plus rapidement quand ils se rapprochent et que la gravité devient plus intense, et extrêmement vite, presque aussi vite que la lumière, à proximité du trou, là où la gravité est la plus forte. Si rien n'est fait, votre vaisseau va être aspiré à l'intérieur.

Avec beaucoup de dextérité, Kares, votre second, dévie rapidement le vaisseau de son plongeon et lui fait adopter une trajectoire circulaire, puis coupe les moteurs. Tandis que vous orbitez autour du trou, la force centrifuge due à ce mouvement circulaire équilibre l'attraction gravitationnelle. Votre vaisseau ressemble à la fronde de votre enfance, où la pierre en rotation rapide était tirée par la force centrifuge et retenue par la tension de sa lanière, semblable à la gravité du trou. Pendant que le vaisseau glisse sans effort, vous vous préparez à explorer le trou avec votre équipage.

Vous commencez par une exploration passive : vous utilisez les instruments montés sur vos télescopes pour étudier les ondes électromagnétiques (le rayonnement) émises par le gaz tandis qu'il s'écoule vers le trou. Loin du trou, les atomes sont froids, quelques degrés à peine au-dessus du zéro absolu. Étant froids, ils vibrent lentement, et ces vibrations lentes produisent des ondes électromagnétiques oscillant lentement, des ondes dont les crêtes sont éloignées les unes des autres, des ondes de grande longueur d'onde. Ce sont des ondes radio (voir la figure P.2). Plus près du trou, là où la gravité a accéléré les atomes, ceux-ci entrent en collision les uns avec les autres et leur température s'élève à plusieurs milliers de degrés. La chaleur les fait vibrer plus rapidement, et ils émettent des ondes oscillant plus vite, des ondes de longueur d'onde plus courte, des ondes que vous identifiez comme une lumière aux teintes variées : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, violet (voir la figure P.2). Encore plus près du trou, la gravité est plus forte, le courant plus rapide, et les collisions chauffent maintenant les atomes à plusieurs millions de degrés. Ils vibrent très rapidement, produisant des ondes électromagnétiques de très courte longueur d'onde, des rayons X. En observant ces rayons X



**P.1** Les atomes de gaz, attirés par la gravité du trou noir, convergent vers lui de toutes les directions.

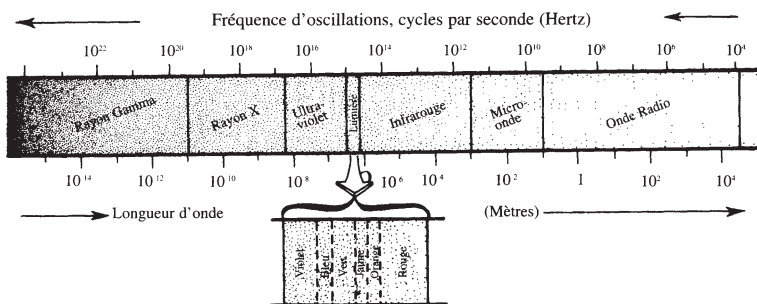
jaillir du voisinage du trou, vous vous rappelez que c'est précisément ainsi, en découvrant de tels rayons X, que les astrophysiciens identifièrent en 1972 le premier trou noir dans l'espace lointain, Cygnus X-1, à 6 000 années-lumière de la Terre<sup>3</sup>.

Orientant vos télescopes encore plus près du trou, vous détectez des rayons gamma, émis par des atomes encore plus chauds. Puis, toujours plus près, au centre de ce brillant feu d'artifice, vous voyez une grande sphère absolument noire : c'est le trou noir, absorbant toute la lumière, tous les rayons X et gamma émis par les atomes situés derrière lui. Vous observez des atomes surchauffés plongeant de tous côtés vers le trou noir. Une fois à l'intérieur de celui-ci, dans une chaleur extrême, ils doivent vibrer plus rapidement et rayonner plus violemment que jamais, mais ce rayonnement ne peut échapper à l'intense gravité du trou noir. Rien ne s'échappe, et c'est pour cela que le trou paraît noir, d'un noir absolu<sup>4</sup>.

Vous examinez de plus près la sphère noire avec votre télescope. Elle a un bord net, la surface du trou, la frontière d'où l'on ne s'échappe pas. Juste *au-dessus* de cette surface, tout peut échapper à la poigne de la gravité, avec assez d'efforts. Mais juste *en dessous*, la gravité est inexorable et rien ne peut jamais s'en

3. Voir le chapitre VIII.

4. Voir les chapitres III et VI.



**P.2** Le spectre des ondes électromagnétiques, allant des ondes radio, aux grandes longueurs d'onde (basses fréquences), jusqu'aux rayons gamma, aux longueurs d'onde les plus courtes (très hautes fréquences). Pour une explication de la notation utilisée ici pour les nombres ( $10^{21}$ ,  $10^{-12}$ , etc.), veuillez vous reporter à l'encadré P.1 ci-dessous.

échapper, quelles que soient les tentatives : ni les fusées, ni les particules, ni la lumière, ni aucun rayonnement d'aucune sorte n'atteindront jamais votre vaisseau en orbite. La surface du trou est comme l'horizon sur Terre, au-delà duquel rien n'est visible. C'est pour cela qu'on l'appelle l'*horizon du trou noir*<sup>5</sup>.

Kares, votre second, mesure soigneusement la circonférence de l'orbite du vaisseau : un million de kilomètres, la moitié de la circonférence de l'orbite de la Lune autour de la Terre. Elle observe ensuite les étoiles lointaines et les voit tourner dans le ciel, reflétant le mouvement du vaisseau. Elle déduit de leur mouvement apparent que le vaisseau met 5 mn 46 s à boucler une orbite autour du trou : c'est la *période orbitale* du vaisseau.

A partir de la période et de la circonférence de l'orbite, vous pouvez calculer la masse du trou. La méthode est la même que celle utilisée en 1685 par Isaac Newton pour calculer la masse du Soleil : plus un objet (le Soleil ou le trou noir) est massif, plus son attraction gravitationnelle est forte, plus un corps en orbite (planète ou vaisseau) doit être rapide pour ne pas être aspiré à l'intérieur et plus la période orbitale est courte. En appliquant la version mathématique de cette loi de la gravitation<sup>6</sup> à l'orbite de votre vaisseau, vous calculez que la masse

5. Voir le chapitre VI.

6. Voir le chapitre II.

du trou noir Hadès est dix fois plus grande que celle du Soleil (10 « masses solaires »)<sup>7</sup>.

Vous savez que ce trou fut créé il y a bien longtemps à la mort d'une étoile, une mort au cours de laquelle l'étoile, incapable de résister à l'attraction de sa propre gravité, s'effondra sur elle-même, implosa<sup>8</sup>. Vous savez aussi que la masse ne changea pas au cours de l'implosion, et que le trou noir Hadès a aujourd'hui la même masse que l'étoile mère autrefois, ou presque la même. La masse de Hadès est un peu plus grande car elle a été augmentée de la masse de tout ce qui est tombé dans le trou depuis sa naissance, du gaz interstellaire, des rochers, des vaisseaux spatiaux...

Vous savez tout cela car, avant de vous embarquer pour le voyage, vous avez étudié les lois fondamentales de la gravitation, ces lois qui furent découvertes sous une forme approchée par Newton en 1687, et radicalement modifiées et précisées par Albert Einstein en 1915<sup>9</sup>. Vous savez que les lois de la gravitation d'Einstein, qu'on appelle la *relativité générale*, obligent les trous noirs à se comporter de cette façon, aussi inexorablement qu'elles obligent une pierre qu'on lâche à tomber vers le sol. Il est aussi impossible à la pierre de violer les lois de la gravitation et de tomber vers le haut, ou de flotter en l'air, qu'au trou noir de désobéir à ces lois. Un trou noir naît obligatoirement quand une étoile implose sur elle-même, sa masse à la naissance est la même que celle de l'étoile, et elle augmente chaque fois que quelque chose tombe dedans<sup>10</sup>. De même, si l'étoile qui s'effondre est en rotation, le trou noir nouveau-né est aussi en rotation, et le *moment cinétique* du trou, une mesure précise de la rapidité de sa rotation, est le même que celui de l'étoile.

Avant votre voyage, vous avez aussi étudié l'histoire des idées des hommes au sujet des trous noirs. Il y a bien longtemps, dans les années 70, Brandon Carter, Stephen Hawking, Werner Israel et leurs collègues déduisirent à partir des lois de la gravitation décrites par la relativité générale d'Einstein<sup>11</sup> qu'un trou noir était

7. Les lecteurs qui voudraient calculer par eux-mêmes les propriétés des trous noirs trouveront les équations correspondantes à la fin de ce livre.

8. Voir les chapitres III à V.

9. Voir le chapitre II.

10. Pour une discussion plus approfondie sur la façon dont les lois de la physique *obligent* les trous noirs, tout comme le système solaire ou l'Univers, à se comporter d'une certaine manière, lisez les derniers paragraphes du chapitre I.

11. Voir le chapitre II.

un objet extrêmement simple<sup>12</sup>. Toutes les propriétés du trou, l'intensité de son attraction gravitationnelle, l'angle dont il dévie les rayons lumineux, la forme et la taille de sa surface, sont entièrement déterminées par trois nombres : la masse du trou, que vous connaissez déjà, son moment cinétique, que vous ne connaissez pas encore, et sa charge électrique. Vous êtes de plus conscient qu'un trou dans l'espace interstellaire ne risque guère d'avoir une charge électrique importante, car sinon il attirerait rapidement des charges de signe opposé dans le gaz interstellaire, neutralisant ainsi sa charge propre.

En tournant sur lui-même, le trou entraîne l'espace proche de lui dans un tourbillon, un mouvement de rotation relativement à l'espace éloigné, tout comme une hélice d'avion en rotation entraîne l'air autour d'elle. Ce tourbillon de l'espace doit entraîner avec lui tout ce qui se trouve à proximité<sup>13</sup>.

Pour connaître le moment cinétique de Hadès, vous recherchez donc la trace d'un tourbillon dans le courant d'atomes interstellaires qui s'approchent du trou. A votre grande surprise, en arrivant de plus en plus près du trou, les atomes vont de plus en plus vite mais ne montrent aucun signe de tourbillon. Si certains atomes s'enroulent dans une direction autour du trou en tombant, d'autres s'enroulent dans l'autre direction, et entrent de temps en temps en collision avec les premiers, mais en moyenne la chute des atomes se fait directement vers le trou sans tourner. Votre conclusion est que ce trou noir de 10 masses solaires ne tourne quasiment pas, son moment cinétique est proche de zéro.

Connaissant la masse et le moment cinétique de Hadès, et sachant que sa charge électrique doit être négligeable, vous pouvez maintenant calculer à partir des équations de la relativité générale toutes les propriétés que doit posséder ce trou : l'intensité de son attraction gravitationnelle, l'angle correspondant de déviation des rayons lumineux, et surtout la forme et la taille de son horizon.

Si le trou avait été en rotation, son horizon aurait eu un pôle nord et un pôle sud bien marqués, pôles autour desquels il aurait tourné et les atomes auraient tourbillonné en tombant. Il aurait eu un équateur bien marqué à mi-chemin des pôles, et la force centrifuge due à la rotation de l'horizon aurait gonflé cet équateur<sup>14</sup>, tout comme l'équateur terrestre est renflé. Mais Hadès est à peine

12. Voir le chapitre VII.

13. Voir le chapitre VII.

14. Voir le chapitre VII.



en rotation et son équateur est peu renflé : son horizon est pratiquement sphérique du fait des lois de la gravitation. C'est bien ce que vous observez dans votre télescope.

Quant à sa taille, ces mêmes lois stipulent qu'elle augmente avec la masse du trou : la circonférence du trou doit être de 18,5 km fois la masse du trou, en unités de la masse du Soleil <sup>15</sup>. Comme votre mesure de l'orbite vous a appris que le trou a une masse dix fois plus élevée que le Soleil, la circonférence de l'horizon doit être de 185 km, un peu plus que la région parisienne. Vous la mesurez soigneusement à l'aide de vos télescopes : 185 km, en parfait accord avec la prédiction de la relativité générale.

La circonférence de cet horizon est minuscule comparée au million de kilomètres de votre orbite, et à l'intérieur de cette infime région est concentrée une masse dix fois supérieure à celle du Soleil ! Si le trou était un corps solide comprimé dans cette circonférence, sa densité moyenne serait de 200 millions de tonnes par centimètre cube,  $2 \times 10^{14}$  fois la densité de l'eau (pour cette notation, voir l'encadré P.1). Mais le trou noir n'est pas un corps solide. La relativité générale affirme que les 10 masses solaires de matériau stellaire qui créèrent le trou en implosant il y a longtemps se trouvent maintenant rassemblées au centre même du trou, concentrées dans une minuscule région de l'espace appelée *singularité* <sup>16</sup>. Cette singularité, dont la taille ne dépasse pas  $10^{-35}$  m (cent milliards de milliards de fois plus petite qu'un noyau atomique), doit être entourée d'un vide total, hormis le gaz ténu qui tombe dans le trou et le rayonnement qu'il émet. Il doit y avoir un vide presque absolu de la singularité jusqu'à l'horizon, et de l'horizon jusqu'à votre vaisseau.

La singularité et la matière stellaire qui s'y trouve sont masquées par l'horizon du trou. Vous pouvez attendre aussi longtemps que vous voulez, la matière qui y est enfermée ne pourra jamais en ressortir. La gravité du trou l'interdit. La matière enfermée ne pourra jamais non plus vous envoyer la moindre information, que ce soit par des ondes radio, de la lumière ou des rayons X. En

15. Voir le chapitre III. Cette valeur de 18,5 km qui apparaîtra à plusieurs reprises dans ce livre n'est pas autre chose que quatre fois le nombre  $\pi$  (3,14159), multiplié par la constante G de la gravitation de Newton, par la masse du Soleil et divisé par le carré de la vitesse de la lumière. Les notes correspondant à ce chapitre donnent plusieurs formules utiles pour décrire les trous noirs.

16. Voir le chapitre XIII.

**Encadré P.1**  
**Notation en puissance**  
**pour les petits et les grands nombres**

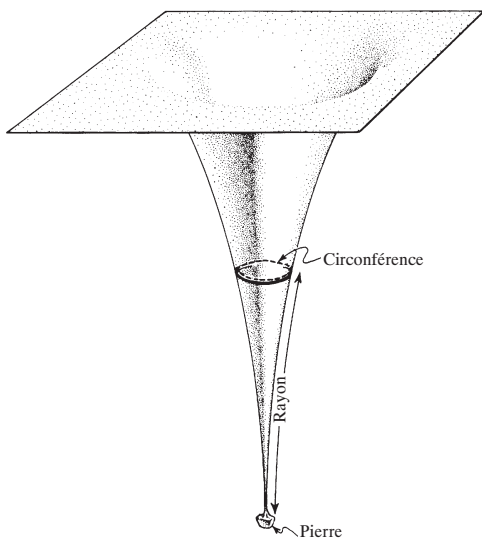
J'utiliserai à l'occasion dans ce livre la « notation en puissance » pour écrire des nombres très petits ou très grands. Par exemple,  $5 \times 10^6$  signifie 5 millions ou 5 000 000 et  $5 \times 10^{-6}$  signifie 5 millionnièmes ou 0,000 005.

En général, la puissance à laquelle est élevé le nombre 10 est le nombre de chiffres dont il faut déplacer la virgule pour amener le nombre dans la notation décimale habituelle. Ainsi,  $5 \times 10^6$  signifie « prenez le nombre 5 (5,000 000 00) et déplacez la virgule de six chiffres vers la droite ». Le résultat est 5 000 000,00. De même,  $5 \times 10^{-6}$  signifie « prenez le nombre 5 et déplacez la virgule de six chiffres vers la gauche ». Le résultat est 0,000 005.

pratique, elle est complètement hors de l'Univers. La seule chose qui en demeure est son intense attraction gravitationnelle : l'intensité est aujourd'hui la même sur votre orbite de un million de kilomètres qu'avant l'implosion de l'étoile qui a formé le trou, mais elle est si forte à l'intérieur de l'horizon que rien ne peut lui résister.

« Quelle distance y a-t-il entre l'horizon et la singularité ? » vous demandez-vous. Bien sûr, vous décidez de ne pas la mesurer directement, ce qui serait suicidaire puisque vous ne reviendriez jamais en deçà de l'horizon pour rendre compte du résultat à la Société mondiale de géographie. Puisque la singularité est si petite,  $10^{-35}$  m, et qu'elle se trouve au centre exact du trou, sa distance à l'horizon est égale au rayon du trou. Vous êtes donc tenté d'en calculer le rayon par la méthode habituelle, diviser la circonférence par  $2\pi$  (6,283185...). Mais vos études sur Terre vous ont appris à ne pas croire à ce calcul. L'intensité de l'attraction gravitationnelle est telle que la géométrie de l'espace est complètement déformée à proximité du trou<sup>17</sup>, tout comme une pierre très lourde placée sur une surface de caoutchouc en déforme la géométrie (figure P.3) ; par conséquent le rayon de l'horizon n'est pas égal à la circonférence divisée par  $2\pi$ .

17. Voir les chapitres III et XIII.



**P.3** Une lourde pierre placée sur une feuille de caoutchouc (un trampoline par exemple) la déforme, comme le montre la figure. La géométrie déformée de la feuille est très voisine de celle de l'espace autour d'un trou noir. Par exemple, la circonférence du cercle noir est très inférieure à  $2\pi$  fois le rayon, tout comme celle du trou noir. Pour plus de détails, reportez-vous aux chapitres III et XIII.

« Cela n'a pas d'importance, pensez-vous, Lobatchevski, Riemann et d'autres grands mathématiciens nous ont appris à calculer les propriétés des cercles quand l'espace est courbé, et Einstein a intégré ces calculs dans la description donnée par la relativité générale des lois de la gravitation. Je peux utiliser les formules adaptées à un espace courbe pour calculer le rayon de l'horizon. »

Mais vous vous souvenez alors, grâce à vos études, que si la masse et le moment cinétique du trou noir suffisent à déterminer toutes les propriétés de l'horizon et son extérieur, ils ne déterminent pas son intérieur. La relativité générale exige que l'intérieur soit chaotique et pas du tout sphérique à proximité de la singularité<sup>18</sup>, tout comme la pointe de la feuille de caoutchouc de la figure P.3, si la pierre a des arêtes vives et tressaute violemment. De plus, la nature chaotique du centre du trou ne dépend pas

18. Voir le chapitre XIII.

seulement de la masse et du moment cinétique du trou, mais aussi des détails de l'implosion qui lui a donné naissance et de la chute du gaz interstellaire par la suite. Et vous ignorez ces détails.

Vous vous dites : « De toute façon, quelle qu'en soit la structure, le centre chaotique doit avoir une circonférence de moins d'un centimètre, et je ferai donc une erreur minime si je le néglige en calculant le rayon de l'horizon. »

Mais vous vous souvenez alors que l'espace peut être tellement déformé au voisinage de la singularité que la région chaotique peut fort bien avoir un rayon de plusieurs millions de kilomètres avec une circonférence d'une fraction de centimètre, exactement comme la pierre de la figure P.3 peut, si elle est assez lourde, déformer la feuille de caoutchouc suffisamment pour que la pointe soit extrêmement loin tout en conservant un faible rayon à la circonférence de la région chaotique. L'erreur peut être énorme sur le rayon ainsi calculé. Le rayon de l'horizon n'est tout simplement pas calculable à partir des maigres informations dont vous disposez, la masse et le moment cinétique du trou.

Abandonnant vos rêveries concernant l'intérieur du trou, vous vous apprêtez à explorer les environs de l'horizon. Ne voulant pas risquer de vie humaine, vous demandez à un robot de 10 cm équipé d'une fusée, répondant au nom d'Arnold, d'effectuer l'exploration pour vous et d'en rendre compte au vaisseau. Arnold a des instructions simples : il doit juste allumer son moteur-fusée pour arrêter le mouvement circulaire qu'il partage avec le vaisseau et laisser ensuite la gravité du trou noir l'attirer. Pendant sa chute, il doit diriger un brillant faisceau laser, de couleur verte, vers le vaisseau et coder sur les oscillations électromagnétiques de ce faisceau des informations sur la distance parcourue, sur l'état de ses systèmes électroniques, comme une station de radio code le bulletin d'information sur les ondes radio qu'elle transmet.

Votre équipage dans le vaisseau captera le faisceau laser et Kares pourra le décoder pour obtenir la distance et l'état des systèmes d'Arnold. Elle pourra aussi mesurer la longueur d'onde du faisceau (sa couleur, voir la figure P.2). Ce sera un renseignement important : il dira à quelle vitesse se déplace Arnold. Plus Arnold s'éloignera rapidement du vaisseau et plus le faisceau vert qu'il émet sera vu rouge par le vaisseau : il sera décalé vers les grandes longueurs d'onde par l'effet Doppler<sup>19</sup>. Il y a un décalage addi-

19. Voir l'encadré 2.3.

tionnel vers le rouge dû à l'énergie perdue par le faisceau en luttant contre l'attraction gravitationnelle du trou, et Kares devra corriger son calcul de la vitesse d'Arnold pour tenir compte de ce *décalage gravitationnel*<sup>20</sup>.

Et l'expérience commence. Arnold allume son moteur, quitte l'orbite et plonge vers le trou. Au début de sa chute, Kares met en route un chronomètre pour noter le temps d'arrivée de ses signaux laser. Au bout de 10 s, les signaux décodés rapportent que tout va bien à bord et que le robot a déjà parcouru 2 630 km. Kares déduit de la couleur de la lumière laser qu'il file à 530 km/s (kilomètre par seconde). Quand le chronomètre indique 20 s, sa vitesse a doublé, elle est maintenant de 1 060 km/s, et la distance parcourue a quadruplé, atteignant 10 500 km. Le chronomètre continue à égrener les secondes, et au bout de 60 s la vitesse d'Arnold atteint 9 700 km/s et il a chuté de 135 000 km, les 5/6 de la distance à l'horizon.

Vous devenez très attentif. Les prochaines secondes seront cruciales et Kares met en route un enregistreur à grande vitesse pour rassembler toutes les données qui arrivent. A 61 s, Arnold signale que tout fonctionne normalement à bord. L'horizon n'est plus qu'à 14 000 km et il s'en approche à 13 000 km/s. A 61 s et 7/10, tout va bien, il ne reste plus que 1 700 km à parcourir. La vitesse est de 39 000 km/s, à peu près le dixième de la vitesse de la lumière, et la couleur du laser commence à changer rapidement. En un dixième de seconde, elle parcourt tout le spectre électromagnétique, du vert au rouge, puis à l'infrarouge, aux micro-ondes, aux ondes radio, à... A 61 s et 8/10, tout est fini. Le faisceau laser a disparu, Arnold a atteint la vitesse de la lumière et il s'est évanoui derrière l'horizon. Dans le dernier dixième de seconde, juste avant que disparaisse le faisceau, Arnold rapportait, heureux : « Tout va bien, tout va bien, l'horizon s'approche, tout va bien, tout va bien... »

Pendant que votre excitation retombe, vous examinez les données enregistrées et vous notez tous les détails de la dérive de la longueur d'onde du laser. Vous voyez que cette longueur d'onde augmentait lentement au début de la chute d'Arnold, puis de plus en plus vite. De façon surprenante, après que la longueur d'onde eut quadruplé, le rythme de doublement est resté presque constant : la longueur d'onde doublait tous les 140 millièmes de seconde. Après 33 doublements, soit 4,6 ms, la longueur

20. Voir les chapitres II et III.

d'onde avait atteint 4 km, la limite de vos possibilités de détection. Il est probable qu'elle ait continué à doubler ensuite. Comme il faut un nombre infini de doublings pour que la longueur d'onde devienne infinie, des signaux extrêmement faibles d'une longueur d'onde extrêmement élevée continuent sans doute à émerger du voisinage de l'horizon.

Cela signifie-t-il qu'Arnold n'a pas encore traversé l'horizon et ne le traversera jamais ? Non, pas du tout. Ces derniers signaux, dont la longueur d'onde doublera éternellement, seront éternellement en train d'échapper à la poigne de la gravitation du trou. Arnold a traversé l'horizon il y a plusieurs minutes en filant à la vitesse de la lumière. Ces faibles signaux qui subsistent ne continuent à arriver que parce que leur durée de voyage est très longue, ce sont des reliques du passé <sup>21</sup>.

Après plusieurs heures utilisées à étudier les données de la chute d'Arnold, et après un long sommeil pour reprendre des forces, vous vous préparez à l'étape suivante de l'exploration. Cette fois, vous allez explorer vous-même le voisinage de l'horizon, mais vous le ferez avec beaucoup plus de précautions qu'Arnold.

Saluant votre équipage, vous embarquez dans une capsule et vous vous éjectez du vaisseau. Vous l'accompagnez dans son orbite circulaire, puis vous allumez vos moteurs très doucement pour ralentir à peine. Cela réduit légèrement la force centrifuge qui maintenait votre capsule sur orbite, et la gravité du trou vous attire sur une orbite à peine plus petite. Au fur et à mesure que vous freinez, votre orbite se réduit. Cette lente spirale descendante a pour objectif de vous amener en sécurité sur une orbite circulaire juste au-dessus de l'horizon, une orbite ayant une circonférence seulement 1,000 1 fois plus grande que celle de l'horizon. Là, vous pouvez étudier la plupart de ses propriétés en échappant à sa poigne fatale.

Tandis que votre orbite se rétrécit lentement, il se passe quelque chose de bizarre. Vous vous en rendez déjà compte quand l'orbite est encore de 100 000 km. Tandis que vous flottez dans la capsule, les pieds tournés vers le trou et la tête vers les étoiles, vous ressentez une faible traction vers le bas sur vos pieds et vers le haut sur votre tête, vous êtes tout doucement étiré comme de la guimauve. Vous réalisez que la cause en est la gravité du trou : vos pieds en sont plus proches, aussi tire-t-il plus fort sur eux que sur votre tête. La même chose arrivait bien sûr déjà sur Terre, mais

21. Voir le chapitre VI.

la différence de traction entre la tête et les pieds n'y était que d'un millionième, trop faible pour que vous vous en aperceviez. Mais ici dans votre capsule, la différence est voisine de  $1/8$  de la gravité terrestre. Au centre de votre corps, la force centrifuge due à votre mouvement orbital compense exactement l'attraction du trou et tout se passe comme si la gravité n'existait pas : vous flottez librement dans votre capsule. Mais à vos pieds, la gravité est plus forte de  $1/16$  de la gravité terrestre, tandis qu'à votre tête la force centrifuge est plus forte de  $1/16$  de la gravité terrestre.

Stupéfait, vous poursuiviez votre spirale descendante mais votre stupéfaction devient de l'inquiétude. Au fur et à mesure que votre orbite diminue, les forces sur votre tête et sur vos pieds augmentent. La différence de traction entre la tête et les pieds atteint  $1/4$  de la gravité terrestre quand la circonférence est de 80 000 km, elle atteint la gravité terrestre à 50 000 km et quatre fois la gravité terrestre à 30 000 km. Serrant les dents de douleur sous l'écartèlement, vous descendez à 20 000 km, où la tension à laquelle vous êtes soumis atteint quinze fois la gravité terrestre. Vous ne pouvez en supporter davantage ! Vous essayez de résoudre le problème en vous roulant en boule pour rapprocher la tête des pieds et diminuer la différence de forces, mais ces forces sont si puissantes qu'elles ne vous permettent pas de vous mettre en boule : elles vous tendent en une ligne droite radiale de la tête aux pieds. Si votre capsule se rapproche encore de l'horizon, votre corps ne résistera pas et vous serez déchiré ! Il est impossible de s'approcher de l'horizon.

Frustré et grimaçant de douleur, vous freinez la descente de votre capsule, faites demi-tour et accélérez lentement sur des orbites de plus en plus grandes jusqu'à retourner au sein de votre vaisseau.

En entrant dans votre cabine de capitaine, vous épanchez vos frustrations auprès de l'ordinateur principal du vaisseau, Aurore. « Tikhii, tikhii », dit-elle, apaisante, en utilisant des mots de l'ancienne langue russe. « Je sais que vous êtes bouleversé, mais c'est de votre faute en vérité. On vous a parlé de ces forces d'étirement lors de l'entraînement, rappelez-vous. Ce sont les mêmes forces qui produisent les marées des océans sur Terre <sup>22</sup>. »

En repensant à votre entraînement, vous vous souvenez que les océans qui sont du côté où se trouve la Lune sont plus fortement attirés par elle et se gonflent dans sa direction. Les océans du côté

22. Voir le chapitre II.

opposé sont moins fortement attirés et s'écartent donc de la Lune. Le résultat est la présence de deux renflements océaniques et, comme la Terre tourne, ces renflements produisent deux marées hautes toutes les 24 heures. C'est pour rappeler ces marées que la force d'étirement entre la tête et les pieds est appelée *force de marée*. Vous vous souvenez aussi que la relativité générale d'Einstein décrit la force de marée comme une courbure de l'espace ou une distorsion du temps, ou, dans le langage du physicien allemand, une *courbure de l'espace-temps*<sup>23</sup>. La force de marée et la courbure de l'espace-temps vont la main dans la main, l'une accompagnant toujours l'autre, même si dans le cas des marées océaniques la distorsion de l'espace-temps est si faible qu'elle ne peut être mesurée qu'avec des instruments extrêmement précis.

Et Arnold alors ? Pourquoi était-il si allègrement immunisé contre la force de marée du trou ? Pour deux raisons, explique Aurore : d'abord il était bien plus petit que vous, 10 cm de haut seulement, et la force de marée, étant la différence entre les attractions gravitationnelles sur la tête et sur les pieds, en était d'autant plus faible. Et deuxièmement, Arnold était construit avec un alliage de titane extrêmement résistant, qui pouvait supporter une tension beaucoup plus élevée que ne pouvaient le faire votre chair et vos os.

Vous réalisez alors avec horreur qu'Arnold a dû sentir, lors de sa chute à travers l'horizon vers la singularité, l'intensité de la force de marée augmenter jusqu'à ce que même son corps de titane extrêmement solide n'y résiste plus. Moins de 0,000 2 s après avoir franchi l'horizon, son corps étiré et désintégré a dû approcher la singularité centrale. Vous vous souvenez alors de vos cours de relativité générale : la force de marée du trou s'est alors mise à vivre, dansant une danse chaotique, étirant les restes d'Arnold dans une direction puis dans une autre, puis dans une autre encore, de plus en plus vite, de plus en plus violemment, jusqu'à ce que les atomes eux-mêmes soient déformés et ne soient plus reconnaissables. Là en fait réside l'essence d'une singularité : c'est une région où la courbure de l'espace-temps, oscillant de façon anarchique, crée d'énormes forces de marée chaotiques<sup>24</sup>.

Repensant à l'histoire de la recherche sur les trous noirs, vous vous souvenez qu'en 1965 le physicien britannique Roger Penrose utilisa la description des lois de la physique donnée par la relativité

23. Voir le chapitre II.

24. Voir le chapitre XIII.



générale pour prouver qu'une singularité devait résider dans chaque trou noir, tandis qu'en 1969 la troïka russe formée par Lifchitz, Khalatnikov et Belinsky en déduisit qu'à proximité immédiate de la singularité les forces de marée devaient osciller chaotiquement, comme la guimauve qu'étire d'un côté puis de l'autre la machine qui la fabrique<sup>25</sup>. C'était l'âge d'or de la recherche théorique sur les trous noirs, ces années 60 et 70 ! Mais comme les physiciens de cette époque bénie n'avaient pas une sagacité suffisante pour résoudre les équations de la relativité générale, un des principaux traits des trous noirs leur échappa. Ils pouvaient seulement conjecturer que si une étoile implosait en créant une singularité, elle créait aussi un horizon la masquant de l'extérieur : une singularité, pensait-on, ne devait jamais apparaître « nue », exposée aux yeux de tout l'Univers. Penrose appelait cette conjecture la « censure cosmique » car, si elle était correcte, elle censurerait toute information expérimentale concernant les singularités. On ne pourrait jamais conduire d'expérience pour vérifier si les singularités étaient bien comprises théoriquement, à moins de vouloir payer le prix de pénétrer dans un trou noir : y mourir en effectuant l'expérience, tout en étant incapable de transmettre les résultats à l'extérieur en témoignage de ses efforts.

Bien que Dame Abygaïle Lyman ait finalement résolu en 2023 la question de la censure cosmique, la solution n'a aucune importance pour vous en ce moment. Les seules singularités répertoriées dans les atlas de votre vaisseau correspondent aux trous noirs, et vous refusez de payer de votre vie leur exploration.

Heureusement, il existe beaucoup de phénomènes intéressants juste à l'extérieur de l'horizon d'un trou noir. Vous êtes décidé à explorer ces phénomènes et à en rendre compte de première main à la Société mondiale de géographie, mais vous ne pouvez pas le faire à proximité de l'horizon de Hadès. La force de marée y est trop intense et vous devez rechercher un trou noir où elle soit plus faible.

Aurore vous rappelle que la relativité générale prédit que la force de marée devient plus faible au-dessus de l'horizon quand la masse du trou augmente. Ce comportement en apparence paradoxal a une origine simple : la force de marée est proportionnelle à la masse du trou divisée par le cube de la circonférence de l'horizon, laquelle est aussi proportionnelle à la masse. La force de marée près de l'horizon diminue donc rapidement quand la

25. Voir le chapitre XIII.

masse augmente : pour un trou noir d'un million de masses solaires, cent mille fois plus massif que Hadès, l'horizon sera cent mille fois plus grand et la force de marée dix milliards de fois plus faible ( $10^{10}$ ). Ce serait confortable : aucune douleur à craindre ! Aussi commencez-vous à établir des plans pour la prochaine étape de votre voyage : un voyage vers le plus proche trou noir d'un million de masses solaires figurant dans l'*Atlas des trous noirs* de Schechter, un trou appelé Sagittaire au centre de notre Galaxie, la Voie lactée, à 30 100 années-lumière.

Plusieurs jours après, votre équipage transmet à la Terre une description détaillée de vos explorations de Hadès, y compris un film vous montrant étiré par la force de marée, et des images des atomes tombant dans le trou. La description mettra 26 ans pour parcourir les 26 années-lumière qui vous séparent de la Terre, et elle sera accueillie en grande pompe par la Société mondiale de géographie.

Dans son message, l'équipage décrit aussi vos plans de voyage vers le centre de la Voie lactée : les moteurs du vaisseau communiqueront une accélération constante de 1 g, une fois l'accélération terrestre pour que votre équipage et vous ressentiez à l'intérieur du vaisseau la même gravité confortable que sur Terre. Le vaisseau accélérera vers le centre galactique pendant la première moitié du voyage, puis pivotera de  $180^\circ$  et décélérera à 1 g pendant la seconde moitié. Le voyage de 30 100 années-lumière durera 30 102 ans vu de la Terre, mais 20 ans seulement vu du vaisseau. Selon la relativité restreinte d'Einstein<sup>26</sup>, la grande vitesse du vaisseau provoquera une *distorsion du temps* tel qu'il sera mesuré à bord. Cette distorsion du temps aura pour effet de transformer le vaisseau en machine à voyager dans le temps, vous envoyant loin dans le futur de la Terre en vieillissant peu vous-même<sup>27</sup>.

Vous expliquez à la Société mondiale de géographie que votre prochain message viendra du centre de la Galaxie, après votre exploration du Sagittaire, le trou d'un million de masses solaires qui s'y trouve. Les membres de la Société doivent se mettre en hibernation profonde pendant 60 186 ans s'ils veulent être vivants pour recevoir votre message ( $30\ 102 - 26 = 30\ 076$  ans entre le moment où ils recevront le message et celui où vous aurez atteint le centre galactique, plus 30 110 ans pour que votre message voyage du centre galactique à la Terre).

26. Voir le chapitre I.

27. Voir le chapitre I.

*Sagittaire*

Après vingt ans de voyage, mesurés à l'horloge du bord, votre vaisseau ralentit à proximité du centre galactique. Vous voyez dans le lointain un riche mélange de gaz et de poussières se précipitant de toutes les directions vers un énorme trou noir. Kares ajuste les moteurs pour amener le vaisseau sur une orbite circulaire régulière, bien au-dessus de l'horizon. En mesurant la période et la circonférence de l'orbite et en portant les résultats dans la formule de Newton, vous calculez la masse du trou noir. Elle s'élève à un million de masses solaires comme l'affirme l'*Atlas des trous noirs* de Schechter. L'absence de tourbillons dans le flux de gaz et de poussières vous permet de déduire que le trou ne tourne pas très vite : son horizon doit donc être sphérique et sa circonférence de 18,5 millions de kilomètres est huit fois plus grande que l'orbite de la Lune autour de la Terre.

Après avoir étudié de plus près la chute du gaz, vous vous préparez à descendre vers l'horizon. Par sécurité, Kares a établi une communication par laser reliant votre capsule à l'ordinateur principal du vaisseau, Aurore. Vous quittez alors le vaisseau, faites pivoter votre capsule pour que son moteur-fusée soit orienté en sens inverse de votre mouvement orbital, et l'allumez pour ralentir doucement et plonger en une lente spirale d'orbite circulaire en orbite circulaire.

Tout se passe comme prévu jusqu'à ce que vous arriviez à une orbite de 55 millions de kilomètres (trois fois la circonférence de l'horizon). A ce moment, la douce poussée de votre moteur, au lieu de vous amener à une orbite légèrement plus serrée, vous expédie en un plongeon suicidaire vers l'horizon. Pris de panique, vous faites pivoter votre capsule et mettez toute la puissance pour remonter sur une orbite au-delà des 55 millions de kilomètres.

« Que diable s'est-il passé ? Qu'est-ce qui est allé de travers ? demandez-vous à Aurore par laser.

– Tikhii, tikhii, répond-elle, apaisante. Vous avez calculé votre orbite selon la description donnée par Newton des lois de la gravitation. Mais ce n'est qu'une approximation des vraies lois qui gouvernent l'Univers<sup>28</sup>, une bonne approximation loin de l'horizon mais qui devient mauvaise quand on s'en approche. La rela-

28. Voir le chapitre II.

tivité générale d'Einstein, plus précise et plus proche des vraies lois près de l'horizon, prédit que l'attraction gravitationnelle y est plus intense que Newton pouvait le croire. Pour rester en orbite circulaire, cette gravité plus forte doit être équilibrée par une force centrifuge plus grande, ce qui veut dire que vous devez augmenter votre vitesse autour du trou noir. En approchant de l'horizon, vous auriez dû faire pivoter votre capsule et accélérer. Comme au contraire vous avez continué à freiner, la gravité l'a emporté sur la force centrifuge en deçà de trois fois la circonférence de l'horizon, et vous a expédié vers le centre. »

« Satanée Aurore ! pensez-vous. Elle répond toujours à mes questions, mais ne donne jamais spontanément les informations cruciales. Elle ne me prévient jamais quand je commets une erreur ! » Vous en connaissez bien sûr la raison. La vie humaine perdrait de son piquant et de sa richesse si les ordinateurs étaient autorisés à avertir à chaque erreur commise. Il y a déjà longtemps (depuis 2032) qu'une loi du Conseil mondial oblige tous les ordinateurs à posséder un blocage de Hobson empêchant ces avertissements. Quel qu'en soit son désir, Aurore ne peut court-circuiter son blocage de Hobson.

Maîtrisant votre exaspération, vous faites pivoter votre capsule et commencez une suite contrôlée : une poussée vers l'avant, une spirale descendante, une orbite circulaire, une poussée vers l'avant, une spirale descendante, une orbite circulaire... qui vous fait descendre de 3 circonférences de l'horizon à 2,5 puis à 2 à 1,6 à 1,55 à 1,51 à 1,505 à 1,501 à... Quelle frustration ! Plus vous accélérez, plus votre orbite est rapide et plus elle est petite. Mais alors que vous approchez de la vitesse de la lumière, votre orbite ne parvient qu'à une fois et demie la circonférence de l'horizon. Comme vous ne pouvez pas dépasser la vitesse de la lumière, il n'y a aucun espoir d'approcher de l'horizon par cette méthode.

Vous appelez à nouveau Aurore à la rescousse, et encore une fois elle vous apaise et explique : il n'existe pas d'orbite circulaire en dessous de une fois et demie la circonférence de l'horizon. L'attraction gravitationnelle y est si forte qu'aucune force centrifuge ne peut l'équilibrer, même si l'on tourne autour du trou noir à la vitesse de la lumière. Pour aller plus près, explique Aurore, il faut abandonner l'orbite circulaire et descendre au contraire directement vers l'horizon, les moteurs à pleine puissance pour freiner une chute qui serait catastrophique. La puissance de vos fusées peut équilibrer la gravité du trou et vous permettre de descendre doucement et de vous immobiliser juste au-dessus de

l'horizon, comme les astronautes s'immobilisaient juste au-dessus de la surface de la Lune sous la poussée de leur moteur-fusée.

Ayant désormais appris la prudence, vous demandez à Aurore son avis sur les conséquences d'une pareille poussée, forte et continue des fusées. Vous expliquez que vous désirez vous immobiliser à 1,000 l circonférence de l'horizon, endroit d'où vous pouvez expérimenter la plupart de ses effets mais dont vous pouvez néanmoins repartir. Si vous équilibrez la gravitation à cet endroit par une poussée continue des moteurs, quelle accélération allez-vous ressentir ? Aurore répond avec douceur : « Cent cinquante millions de fois la gravité terrestre. »

Profondément découragé, vous accélérez et remontez en spirale jusqu'au vaisseau.

Après un long sommeil, suivi de cinq heures de calculs avec les formules de la relativité générale relatives aux trous noirs, trois heures à plonger dans l'*Atlas des trous noirs* de Schechter, et une heure de consultation de l'équipage, vous préparez les plans de votre prochaine étape.

Votre équipage rapporte alors à la Société mondiale de géographie, en supposant de manière optimiste qu'elle existe encore, le récit de votre expérience avec Sagittaire, et termine en décrivant votre plan.

Vos calculs montrent que plus le trou est grand et plus l'accélération qu'il vous faut supporter pour que la poussée des moteurs vous immobilise à 1,000 l circonférence de l'horizon est faible. Pour une accélération de 10 gravités terrestres, douloureuse mais supportable, le trou noir doit avoir une masse de 15 000 milliards de masses solaires ( $15 \times 10^{12}$ ). Le plus proche trou noir de cette taille est Gargantua, bien au-delà des limites de la Voie lactée (100 000 années-lumière), bien au-delà de l'amas de galaxies de la Vierge (100 millions d'années-lumière), autour duquel orbite notre Galaxie. En fait, il se trouve près du quasar 3C273, à 2 milliards d'années-lumière de la Voie lactée et à 10 % de la distance où se situe le bord observable de l'Univers.

Le plan, explique votre équipage dans son message, est un voyage jusqu'à Gargantua. En utilisant à nouveau une accélération de 1 g pendant la première moitié du voyage et une décélération de 1 g pendant la seconde, le périple nécessitera 2 milliards d'années vu de la Terre, mais seulement 42 ans pour votre équipage et vous dans le vaisseau grâce à la distorsion du temps due à la vitesse. Si les membres de la Société mondiale de géographie ne veulent pas courir le risque d'une hibernation de 4 milliards

d'années (2 milliards pour que vous atteigniez Gargantua, plus 2 milliards pour que votre message parvienne à la Terre), alors ils devront renoncer à recevoir votre prochain message.

### *Gargantua*

Après quarante-deux années de voyage, mesurées à l'horloge du bord, votre vaisseau ralentit à proximité de Gargantua. Au-dessus de votre tête vous apercevez le quasar 3C273 avec ses deux jets d'un bleu brillant s'échappant du centre <sup>29</sup>, au-dessous de vous l'abîme noir de Gargantua. Vous plaçant en orbite autour de lui et effectuant vos mesures habituelles, vous vérifiez que sa masse est effectivement de 15 000 milliards de masses solaires, qu'il tourne très lentement et que la circonférence de l'horizon est de 29 années-lumière. Voici enfin un voisinage que vous pouvez explorer en n'éprouvant qu'une force de marée assez faible et des accélérations supportables ! La sécurité de l'exploration est telle que vous décidez d'y emmener le vaisseau tout entier au lieu d'une simple capsule.

Avant de commencer la descente, vous demandez quand même à votre équipage de prendre une photo du quasar géant au-dessus de vous, des centaines de milliards d'étoiles en orbite autour de Gargantua, et des milliards de galaxies semées à travers le ciel. Il prend aussi une photo du disque noir de Gargantua en dessous, à peu près de la taille du Soleil observé de la Terre. A première vue, il semble faire écran à la lumière de toutes les étoiles et galaxies situées derrière lui. Mais en y regardant de plus près, votre équipage se rend compte que le champ de gravitation du trou se comporte comme une lentille <sup>30</sup> qui dévie une partie de la lumière des étoiles et des galaxies qui passe près de l'horizon, et la focalise en un mince anneau brillant sur le bord du disque noir. Là, dans cet anneau, vous pouvez voir plusieurs images de chaque étoile masquée : une image produite par les rayons lumineux déviés vers le bord droit du disque, une autre par les rayons déviés vers le bord gauche, une autre par les rayons ayant fait un tour complet autour du trou avant de vous atteindre, une autre par ceux ayant fait deux tours complets, et ainsi de suite. Le résultat est une structure annulaire extrêmement complexe que votre équipage photographie avec le plus grand soin pour une étude ultérieure.

29. Voir le chapitre IX.

30. Voir le chapitre VIII.

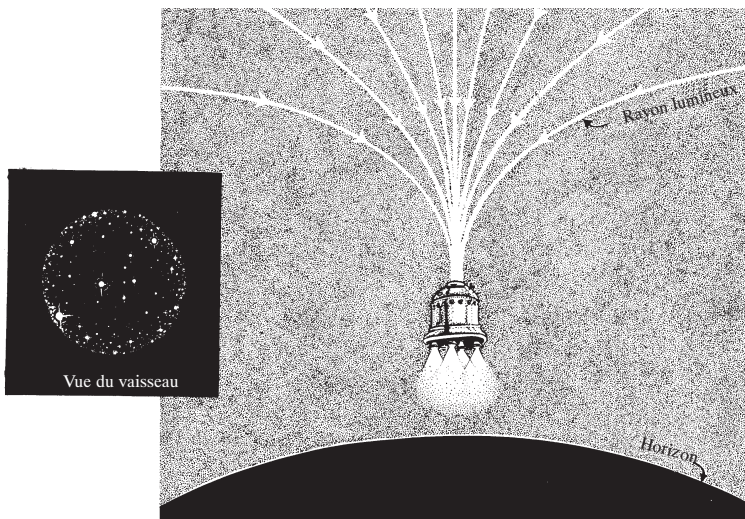
La séance de photos terminée, vous demandez à Kares d'amorcer la descente. Mais il vous faut de la patience car le trou est si vaste qu'en accélérant et décélérant à 1 g, il faudra 13 ans (selon l'horloge du bord) pour spiraler jusqu'à votre but, une orbite dont la circonférence doit être 1,000 1 fois celle de l'horizon. Pendant la descente du vaisseau, votre équipage enregistre les modifications dans l'aspect du ciel autour du vaisseau. Le plus remarquable est le changement dans le disque noir du trou au-dessous du vaisseau : il devient progressivement plus grand. Vous vous attendez qu'il cesse de croître une fois couvert tout le ciel au-dessous de vous, tel un immense plancher noir, laissant le ciel au-dessus aussi clair que sur Terre. Mais non, le disque noir continue à grandir, s'étendant sur les côtés du vaisseau et ne laissant qu'une ouverture circulaire brillante au-dessus de votre tête, ouverture à travers laquelle vous voyez l'univers extérieur (figure P.4). C'est comme si vous aviez pénétré dans un gouffre et plongé de plus en plus profond, et vu l'entrée brillante du gouffre devenir de plus en plus petite.

Pris d'une panique croissante, vous appelez Aurore à l'aide : « Kares a-t-elle mal calculé notre trajectoire ? Avons-nous plongé à travers l'horizon ? Sommes-nous perdus ?

– Tikhii, tikhii, répond-elle, apaisante. Nous sommes en sécurité, nous sommes encore en dehors de l'horizon. L'obscurité n'a recouvert presque tout le ciel qu'en raison du puissant effet de lentille provoqué par la gravité du trou. Regardez cet endroit, presque au-dessus du vaisseau, c'est la galaxie 3C295. Juste avant que notre plongeon commence, elle était dans la direction horizontale, à 90° du zénith. Mais ici, près de l'horizon de Gargantua, la gravité est si forte qu'elle courbe presque à angle droit les rayons lumineux de 3C295, et c'est pour cela qu'elle nous semble être presque au-dessus de nous. »

Rassuré, vous continuez votre descente. Sur l'écran de l'ordinateur, la progression du vaisseau est affichée en indiquant à la fois la distance radiale, parcourue vers le bas, et la circonférence d'un cercle autour du trou noir passant par votre position. Au début de la descente, la circonférence diminuait de 6,283 185 307 km pour chaque kilomètre de distance radiale. Le rapport de ces deux quantités n'est autre que le nombre  $2\pi$ , comme le prévoit la formule habituelle d'Euclide pour les cercles. Mais, alors que votre vaisseau approche maintenant de l'horizon, ce rapport diminue de plus en plus : il est de 5,960 752 960 à 10 circonférences de l'horizon, de 4,442 882 938 à 2 circonférences de





**P.4** Le vaisseau immobilisé au-dessus de l'horizon du trou noir, et les trajectoires suivies par les rayons lumineux venant de galaxies lointaines. La gravité du trou courbe ces rayons vers le bas (effet de lentille gravitationnelle), et les hommes à bord du vaisseau voient toute la lumière rassemblée dans une zone brillante au-dessus d'eux.

l'horizon, de 1,894 451 650 à 1,1 circonférence de l'horizon, et de 0,625 200 306 à 1,01 circonférence de l'horizon. De semblables écarts à la géométrie d'Euclide que les enfants apprennent à l'école ne sont possibles que dans un espace courbe : vous observez la courbure qui accompagne la force de marée du trou selon la prédiction de la relativité générale<sup>31</sup>.

Dans la dernière étape de votre descente, Kares augmente de plus en plus la puissance des moteurs pour ralentir la chute, et le vaisseau finit par s'immobiliser à 1,000 1 circonférence de l'horizon avec une accélération de 10 g pour équilibrer la violente attraction gravitationnelle du trou. Pendant le dernier kilomètre de distance radiale, la circonférence n'a diminué que de 0,062 828 712 km.

31. Voir les chapitres II et III.



Avec beaucoup d'efforts pour lever leurs mains du fait de cette accélération de 10 g, les membres de votre équipage dirigent les caméras des télescopes pour une longue et minutieuse séance de photos. A part quelques faibles traînées occasionnelles de rayonnement tout autour de vous, dues aux collisions qui chauffent le gaz en chute libre, les seules ondes électromagnétiques que vous enregistrez viennent de la tache brillante au-dessus de votre tête. Elle est petite, son diamètre de  $3^\circ$  n'est que six fois celui du Soleil vu de la Terre. Mais, serrées dans cette tache, se trouvent les images de toutes les étoiles qui orbitent autour de Gargantua et de toutes les galaxies de l'Univers. Exactement au centre se situent les galaxies qui sont réellement au-dessus de votre tête. A 55 % de la distance entre le centre et le bord de la tache se trouvent les galaxies qui sont en fait en position horizontale, à  $90^\circ$  du zénith, et à 65 % celles qui sont en fait de l'autre côté du trou, juste au-dessous de vous. Dans les derniers 30 % se trouve une seconde image de chaque galaxie, et dans les derniers 2 % une troisième image !

Tout aussi surprenant, les couleurs de toutes les étoiles et de toutes les galaxies sont fausses. Une galaxie qui est verte en réalité semble briller en rayons X : la gravité de Gargantua, en attirant la lumière de la galaxie, l'a aussi rendue plus énergétique en décroissant sa longueur d'onde de  $5 \times 10^{-7}$  m (couleur verte) à  $5 \times 10^{-9}$  m (rayons X). De même, le disque externe du quasar 3C273 qui émet, comme vous le savez, un rayonnement infrarouge de  $5 \times 10^{-5}$  m de longueur d'onde vous paraît briller en vert à  $5 \times 10^{-7}$  m de longueur d'onde.

Après avoir soigneusement enregistré tous les détails de la tache de lumière au-dessus de votre tête, vous dirigez votre attention vers l'intérieur du vaisseau. Vous vous attendez un peu à ce que, si près de l'horizon du trou, les lois de la physique soient changées d'une manière ou d'une autre, et que ces changements affectent votre physiologie. Mais non. Vous regardez votre second : Kares semble normale. Vous regardez son adjoint, Bret : il semble normal. Vous vous touchez : tout paraît normal. Vous buvez un verre d'eau : hormis les effets d'une accélération de 10 g, l'eau suit son chemin habituel. Kares allume un laser à argon : celui-ci produit la même lumière verte que d'habitude. Bret allume brièvement un laser à rubis, mesure le temps que met l'impulsion pour aller jusqu'à un miroir et en revenir, et calcule à partir de là la vitesse de la lumière : le résultat est absolument le même que dans un laboratoire terrestre (299 792 km/s).

Tout est normal dans le vaisseau, exactement comme s'il était posé à la surface d'une planète massive où l'accélération de la pesanteur serait de 10 g. Si vous ne regardiez pas à l'extérieur pour voir cette bizarre tache lumineuse au-dessus et l'obscurité envahissante tout autour, vous ne sauriez pas que vous êtes tout près de l'horizon d'un trou noir et non en sûreté à la surface d'une planète. Enfin presque. Le trou noir courbe l'espace à l'intérieur du vaisseau comme à l'extérieur, et des instruments assez précis peuvent déceler cette courbure : par exemple la force de marée entre votre tête et vos pieds. Mais si la courbure a une énorme importance à l'échelle des 300 000 milliards de kilomètres de la circonférence du trou, elle n'a que des effets minimes à l'échelle de votre vaisseau d'un kilomètre. La force de marée entre les deux extrémités du vaisseau n'est que d'un cent millième de milliardième de la gravité terrestre ( $10^{-14}$  g), et elle est mille fois plus faible entre votre tête et vos pieds !

Pour explorer plus avant cette remarquable normalité, Bret lâche hors du vaisseau une capsule équipée d'un instrument à laser pulsé et miroir pour mesurer la vitesse de la lumière. A mesure que la capsule plonge vers l'horizon, l'instrument mesure la vitesse à laquelle la lumière voyage du laser dans le nez de la capsule au miroir dans la queue, et en revient. Le résultat est transmis par laser au vaisseau : « 299 792 km/s, 299 792, 299 792, 299 792... » La couleur du laser reçu vire du vert au rouge, puis à l'infrarouge, aux micro-ondes et aux ondes radio au fur et à mesure que la capsule approche de l'horizon, mais le message reste le même : « 299 792, 299 792, 299 792... » Puis le faisceau laser disparaît, la capsule a traversé l'horizon et pas un instant elle n'a indiqué un quelconque changement de la vitesse de la lumière en son sein, et il n'y a eu aucune modification dans les lois de la physique qui en gouvernaient l'électronique.

Les résultats de ces expériences vous plaisent beaucoup. Au début du  $xx^e$  siècle, Einstein avait proclamé, sur des bases essentiellement philosophiques, que les lois locales de la physique devaient être identiques dans tout l'Univers (locales signifiant dans des régions suffisamment petites pour que l'on puisse négliger la courbure de l'espace-temps). Cette proclamation avait été élevée au rang de principe fondamental de la physique, sous le nom de *principe d'équivalence*<sup>32</sup>. Souvent, au cours des siècles qui suivirent, ce principe fut soumis à des essais expérimentaux mais il

32. Voir le chapitre II.

n'avait jamais été testé de façon aussi complète et aussi claire que par vos expériences près de l'horizon de Gargantua.

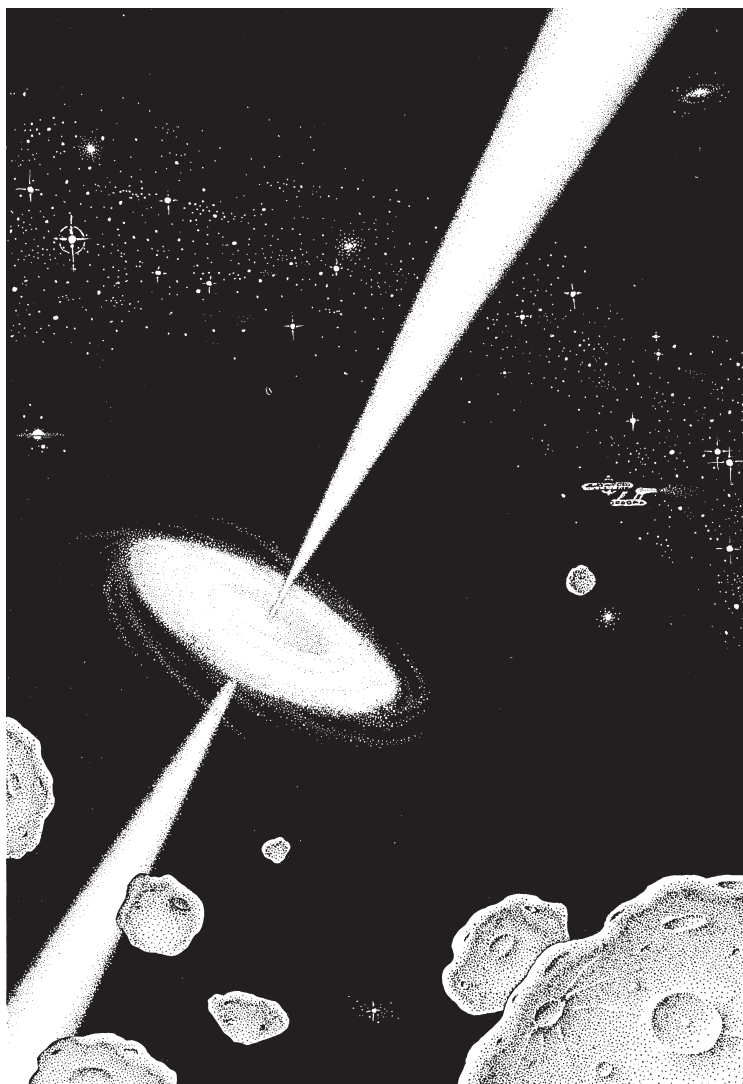
Votre équipage et vous commencez à vous fatiguer de lutter avec 10 gravités terrestres, aussi préparez-vous la dernière étape de votre périple, un retour à la Voie lactée. Pendant le début de ce voyage, votre équipage transmettra un compte rendu de vos explorations de Gargantua. Comme votre vaisseau se déplacera bientôt à une vitesse proche de celle de la lumière, ce compte rendu arrivera à peine un an avant le vaisseau, selon le calendrier terrestre.

Pendant que votre vaisseau s'éloigne de Gargantua, votre équipage étudie avec soin le quasar 3C273 situé juste au-dessus de vous<sup>33</sup> (figure P.5). Ses jets, de minces filaments de gaz brûlant s'échappant du cœur du quasar, sont immenses : leur longueur atteint 3 millions d'années-lumière. Dirigeant vos télescopes vers ce cœur, vous observez leur source : un anneau de gaz épais et chaud, de moins de un million d'années-lumière de diamètre, avec un trou noir au centre. Cet anneau, que les astronomes appellent un *disque d'accrétion*, orbite sans cesse autour du trou noir. En mesurant sa période de rotation et sa circonférence, votre équipage déduit la masse du trou : 2 milliards de masses solaires, sept mille cinq cents fois plus petit que Gargantua mais bien plus grand que tous les trous noirs de la Voie lactée. Un courant de gaz s'écoule de l'anneau vers le trou noir, attiré par sa forte gravité. En s'approchant de l'horizon, ce courant s'enroule autour du trou comme un tourbillon, à la différence de tous ceux que vous avez vus jusqu'à présent. Ce trou est en rotation rapide ! L'axe de rotation est facile à identifier : c'est l'axe autour duquel s'enroule le courant de gaz. Vous remarquez que les deux jets s'échappent le long de cet axe, naissant juste au-dessus des pôles nord et sud de l'horizon. C'est là qu'ils aspirent l'énergie de rotation du trou et celle de l'anneau de gaz<sup>34</sup>, un peu comme une tornade aspire la poussière du sol.

Le contraste entre Gargantua et 3C273 est surprenant : pourquoi Gargantua, avec sa taille et sa masse plusieurs milliers de fois supérieures, ne possède-t-il pas d'anneau de gaz l'encerclant ni de gigantesques jets comme le quasar ? Bret vous donne la réponse après une longue étude au télescope : tous les quelques mois, une étoile orbitant autour du trou plus petit de 3C273 s'égare près de

33 Voir le chapitre IX

34 Voir les chapitres IX et XI.



**P.5** Le quasar 3C273, un trou noir de 2 milliards de masses solaires encerclé par un anneau de gaz (le « disque d'accrétion ») et d'où s'échappent deux immenses jets le long de l'axe de rotation du trou .

l'horizon et se fait déchirer par sa force de marée. L'intérieur de l'étoile, une masse solaire de gaz environ, gicle et s'éparpille le long du trou. Graduellement, la friction interne l'entraîne vers l'anneau et cet apport de gaz frais compense le gaz que l'anneau fournit de façon permanente au trou et aux jets. L'anneau et les jets continuent ainsi à être riches de gaz et ils brillent.

Bret explique que des étoiles s'égarer aussi parfois près de Gargantua mais que, Gargantua étant beaucoup plus gros que 3C273, la force de marée à l'extérieur de l'horizon y est bien plus faible et qu'elle est incapable de déchirer ces étoiles. Gargantua les avale directement sans éparpiller leur gaz en anneau. Et sans cet anneau, Gargantua n'a aucun moyen de produire des jets ou d'autres signes de la violence d'un quasar.

Pendant que votre vaisseau s'éloigne de la poigne de Gargantua, vous établissez vos plans pour le retour à la maison. Quand votre vaisseau atteindra la Voie lactée, 4 milliards d'années se seront écoulées sur Terre depuis votre départ. Les changements dans la société humaine seront tels que vous ne désirez pas y retourner. Votre équipage et vous décidez plutôt de coloniser l'espace autour d'un trou noir en rotation. Vous savez que, tout comme l'énergie de rotation du trou de 3C273 est à l'origine des jets du quasar, l'énergie de rotation d'un trou plus petit peut servir de source d'énergie pour la civilisation humaine.

Vous ne voulez pas arriver près du trou choisi pour découvrir qu'une autre civilisation s'y est déjà installée. Par conséquent, au lieu de mener votre vaisseau vers un trou noir en rotation rapide existant déjà, vous vous dirigez vers un système stellaire qui donnera naissance à un tel trou peu après votre arrivée.

Dans la nébuleuse d'Orion de la Voie lactée, il y avait à l'époque de votre départ un système stellaire binaire, formé de deux étoiles de 30 masses solaires en orbite l'une autour de l'autre. Aurore a calculé que, pendant que vous alliez vers Gargantua, chacune de ces étoiles a dû implorer pour former un trou noir de 24 masses solaires (6 masses solaires de gaz étant éjectées lors de l'implosion). Ces trous noirs doivent maintenant tourner l'un autour de l'autre, formant un système binaire, et en tournant ainsi ils doivent émettre des ondes de forces de marée (des ondes dans la courbure de l'espace-temps) appelées *ondes gravitationnelles*<sup>35</sup>. Ces ondes sont susceptibles de repousser les deux trous comme une balle tirée par un fusil en provoque le recul. A cause de ce

35. Voir le chapitre x.

recul gravitationnel, les deux trous spiralent lentement mais inexorablement l'un vers l'autre. En ajustant bien l'accélération de votre vaisseau, vous pourrez arriver au moment de la dernière étape de cette spirale. Quelques jours après votre arrivée, vous verrez les horizons des deux trous (qui ne tournent pas sur eux-mêmes) tourner l'un autour de l'autre, de plus en plus rapprochés, de plus en plus rapides, jusqu'à ce qu'ils se fondent l'un dans l'autre pour former un seul horizon plus grand et en rotation.

Comme les deux trous initiaux ne tournent pas sur eux-mêmes, ils ne peuvent servir de source d'énergie à votre colonie, mais le trou nouveau-né en rotation rapide sera parfait !

### *A la maison*

Après quarante-deux ans de voyage, votre vaisseau ralentit finalement dans la nébuleuse d'Orion, là où Aurore prédit que doivent se trouver deux trous noirs. Et ils sont là, juste à l'endroit prévu ! En mesurant le mouvement orbital des atomes interstellaires alors qu'ils tombent dans les trous, vous vérifiez que leurs horizons ne sont pas en rotation et qu'ils pèsent 24 masses solaires comme Aurore l'avait prévu. Chaque horizon a 440 km de circonférence, 30 000 km les séparent et ils orbitent l'un autour de l'autre en 13 s. En insérant ces nombres dans les formules de la relativité générale décrivant le recul gravitationnel, vous concluez que les deux trous devraient fusionner dans sept jours. Vous avez juste le temps de préparer vos caméras et vos télescopes pour enregistrer les détails de l'événement. En photographiant l'anneau brillant entourant chaque trou, dû à la lumière des étoiles déviée, il est facile de suivre le mouvement des trous.

Vous voulez être assez près pour bien voir, mais en étant assez loin pour ne pas souffrir des forces de marée de chaque trou. Un bon emplacement, décidez-vous, serait une orbite dix fois plus grande que celle des trous, avec un diamètre de 300 000 km et une circonférence de 940 000 km. Kares manœuvre le vaisseau pour l'amener sur cette orbite, et votre équipage commence une série d'observations.

Pendant les six jours qui suivent, les deux trous se rapprochent graduellement l'un de l'autre en accélérant. Un jour avant la fusion, ils ne sont plus qu'à 18 000 km l'un de l'autre, et leur période orbitale n'est plus que de 6,3 s. Une heure avant la fusion, leur distance est de 8 400 km et leur période de 1,9 s. Une minute

avant la fusion, l'écart est de 3 000 km et leur période de 0,41 s. A 10 s de la fusion, cet écart n'est plus que de 1 900 km et la période est de 0,21 s.

C'est alors que, dans les dix dernières secondes, votre vaisseau commence à être secoué, et vous avec, doucement au début puis de plus en plus violemment. C'est comme si une gigantesque paire de mains vous avait pris par la tête et les pieds et qu'alternativement elle vous étirait et vous comprimait de plus en plus vite et de plus en plus fort. Puis les secousses s'interrompent brusquement et tout devient tranquille.

« Qu'est-ce que c'était ? demandez-vous à Aurore d'une voix tremblante.

– Tikhii, tikhii, répond-elle d'une voix apaisante. C'était la force de marée oscillante des ondes gravitationnelles dues à la fusion des trous. Vous avez l'habitude d'ondes gravitationnelles si faibles que seuls des instruments très sensibles peuvent les détecter. Mais ici, aussi près des trous en fusion, elles sont extrêmement fortes, si fortes qu'elles auraient déchiré le vaisseau si nous l'avions mis sur une orbite trente fois plus petite. Mais nous sommes maintenant en sécurité. La fusion est terminée et les ondes sont parties, elles font maintenant route à travers l'Univers en apportant aux lointains astronomes une description symphonique de la fusion <sup>36</sup>. »

Pointant l'un de vos télescopes vers la source de gravité en dessous, vous voyez qu'Aurore a raison, la fusion est terminée. Là où se trouvaient deux trous auparavant, un seul subsiste, et il est en rotation rapide comme vous pouvez le constater par le tourbillon des atomes qui y tombent. Ce trou constituera un générateur d'énergie idéal pour votre équipage et pour les milliers de générations qui en naîtront.

En mesurant l'orbite du vaisseau, Kares déduit que le trou noir pèse 45 masses solaires. Comme les trous totalisaient 48 masses solaires avant leur fusion, 3 masses solaires ont dû être converties en énergie pure et emportées par les ondes gravitationnelles. Pas étonnant qu'elles vous aient secoué aussi violemment !

Pendant que vous pointez vos télescopes vers le trou, un petit objet arrive comme un boulet vers le vaisseau, dans un jaillissement d'étincelles brillantes, avant d'exploser en ouvrant un large trou dans la paroi de l'appareil. Votre équipage est bien entraîné et il rejoint ses postes de combat avec les robots tandis que vous

36. Voir le chapitre x.

cherchez en vain le vaisseau assaillant. Répondant à votre appel à l'aide, Aurore annonce d'une voix apaisante sur le circuit des haut-parleurs : « Tikhii, tikhii, ce n'est pas une attaque, ce n'est qu'un trou noir primordial qui s'évaporait et qui a explosé<sup>37</sup>. »

« Un quoi ? hurlez-vous.

– Un trou noir primordial qui s'évaporait, et qui s'est détruit lui-même dans une explosion, répète Aurore.

– Explique ! exigez-vous. Que veux-tu dire par *primordial* ? Que veux-tu dire par *s'évaporait* et *a explosé* ? Cela n'a aucun sens : des choses tombent dans un trou noir mais rien n'en sort jamais. Rien ne peut s'en "évaporer". Et un trou noir est éternel, il grossit toujours et ne diminue pas. Il n'y a aucune possibilité qu'un trou noir "explose" et se détruise lui-même. C'est absurde. »

Patiente comme toujours, Aurore fait votre éducation. « Des grands objets comme les humains, les étoiles ou les trous noirs formés par l'implosion d'une étoile sont gouvernés par les lois de la physique *classique*. Mais de petits objets comme les atomes, les molécules ou les trous noirs plus petits qu'un atome sont au contraire gouvernés par des lois différentes, les lois de la physique *quantique*<sup>38</sup>. Alors que les lois de la physique classique interdisent à un trou noir de taille normale de s'évaporer, de rétrécir, d'exploser ou de s'autodétruire, ce n'est pas le cas des lois quantiques. Elles exigent qu'un trou noir de la taille d'un atome s'évapore progressivement et diminue jusqu'au moment où il atteint une circonférence critique, de la taille d'un noyau atomique à peu près. Ce trou, qui pèse un milliard de tonnes malgré sa petite taille, doit alors s'autodétruire en une énorme explosion. Celle-ci convertit toute la masse du trou en un flux d'énergie, un flux environ mille milliards de fois plus intense que les plus puissantes explosions nucléaires que les hommes ont fait sauter sur Terre au xx<sup>e</sup> siècle. C'est une explosion de ce genre qui a endommagé notre vaisseau, explique Aurore.

« Mais ne craignez pas d'autres explosions, continue Aurore. Ces explosions sont très exceptionnelles car les petits trous noirs sont extrêmement rares. Le seul endroit où ils ont pu être créés, c'est l'Univers au moment de sa naissance, juste après le big bang, il y a 15 milliards d'années. C'est pour cela qu'on les appelle des trous noirs *primordiaux*. Le big bang n'en a créé qu'un petit

37. Voir le chapitre XII.

38. Voir les chapitres IV à VI, X, XII à XIV.



nombre, et ils se sont progressivement évaporés et rétrécis depuis leur naissance. Ce n'est qu'occasionnellement que l'un d'eux atteint la taille critique et explose<sup>39</sup>. C'est vraiment par hasard, un hasard très improbable, que l'un d'eux a explosé au moment où il passait à proximité du vaisseau, et il est extrêmement improbable que nous en rencontrions un autre un jour. »

Rassuré, vous demandez à l'équipage de réparer le vaisseau, tandis que vous commencez l'étude du trou de 45 masses solaires qui tourne rapidement au-dessous de vous.

La rotation du trou est trahie par le tourbillon des atomes, mais aussi par la forme de la tache aux bords brillants qu'il forme sur le ciel : cette tache noire est écrasée comme une citrouille, aplatie aux pôles avec un bourrelet à l'équateur. La force centrifuge due à la rotation du trou en est responsable<sup>40</sup>. Mais le bourrelet n'est pas symétrique, il paraît plus gros du côté droit, que la rotation de l'horizon éloigne de vous, que du côté gauche. Aurez l'explication en disant que l'horizon capture les rayons de lumière des étoiles plus facilement s'ils vont en sens inverse de l'horizon.

En mesurant la forme de la tache noire et en la comparant aux formules de la relativité générale, Bret déduit que le moment cinétique du trou est égal à 95 % de la valeur maximale permise pour un trou de sa masse. A partir de ce moment cinétique et de la masse, vous calculez les autres propriétés du trou comme la vitesse de rotation de l'horizon, 270 tr/s (tours par seconde), et sa circonférence à l'équateur, 533 km.

La rotation du trou vous intrigue. Vous n'avez jamais pu jusqu'ici observer de près un trou en rotation. Aussi, non sans remords, vous demandez, et obtenez, un robot volontaire pour aller explorer le voisinage de l'horizon et rendre compte des observations. Vous donnez des instructions très précises à ce robot, nommé Kolob : « Descends jusqu'à dix mètres au-dessus de l'horizon puis mets tes moteurs à pleine puissance pour y rester en équilibre, à la verticale du vaisseau. Utilise tes fusées pour résister à la fois à l'attraction gravitationnelle vers le centre et à l'entraînement du tourbillon. »

Avide d'aventures, Kolob quitte le vaisseau et plonge, en utilisant ses moteurs, doucement au début puis de plus en plus fort, pour résister au tourbillon et rester à la verticale du vaisseau. Au

39. Voir le chapitre XII.

40. Voir le chapitre VII.

début, Kolob ne rencontre pas de problème, mais quand il atteint une circonférence de 833 km, de 56 % plus grande que l'horizon, la lumière verte de son laser envoie le message « Je ne peux pas résister au tourbillon, je ne peux pas, je ne peux pas ! » et, tel un bloc de rocher emporté par une trombe, il est entraîné dans une orbite circulaire autour du trou <sup>41</sup>.

« Ne t'inquiète pas, lui dites-vous. Résiste du mieux que tu le peux, et continue à descendre jusqu'à dix mètres de l'horizon. »

Kolob obéit. Au fur et à mesure qu'il descend, il est entraîné dans un mouvement circulaire de plus en plus rapide. Finalement, quand il arrête sa descente dix mètres au-dessus de l'horizon, il tourne autour du trou pratiquement au même rythme que l'horizon, à 270 tr/s. Quelle que soit la force qu'il met à y résister, il ne peut pas, le tourbillon de l'espace ne le lui permet pas.

« Inverse tes moteurs, lui dites-vous. Si tu ne peux pas tourner à moins de 270 tr/s, essaie d'aller plus vite. »

Kolob essaie, il s'oriente pour rester comme précédemment, à dix mètres de l'horizon, tout en tournant plus rapidement que lui. Mais, bien qu'il ressente l'accélération habituelle engendrée par ses moteurs, vous ne voyez pratiquement aucun changement dans son mouvement : il tourne toujours à 270 tr/s. Et brusquement, avant que vous ayez le temps de lui donner d'autres instructions, il se trouve à court de carburant. Il tombe comme une pierre, son faisceau laser parcourt tout le spectre électromagnétique, du vert à l'infrarouge et aux ondes radio puis au noir, mais son mouvement circulaire ne change pas. Il est parti, il a disparu dans le trou vers la singularité violente que vous ne verrez jamais.

Après trois semaines de deuil, d'expériences et d'observation au télescope, votre équipage commence à construire pour le futur. Apportant les matériaux de planètes lointaines, il bâtit un échafaudage en anneau autour du trou. L'anneau a 5 millions de kilomètres de circonférence, 552 km d'épaisseur et 4 000 km de large. Il tourne juste à la bonne vitesse, 2 tours à l'heure, pour que la force centrifuge équilibre l'attraction du trou dans la couche centrale de l'anneau, à 276 km des faces interne et externe. Ces dimensions sont soigneusement choisies pour que les gens qui préfèrent vivre sous une gravité terrestre installent leurs foyers près des faces interne et externe de l'anneau, tandis que ceux qui préfèrent une gravité plus faible peuvent vivre plus près de son

41. Voir le chapitre VII.

centre. Ces différences de gravité sont en partie dues à la force centrifuge venant de la rotation de l'anneau et en partie dues à la force de marée du trou, ou à la courbure de l'espace-temps dans le langage d'Einstein.

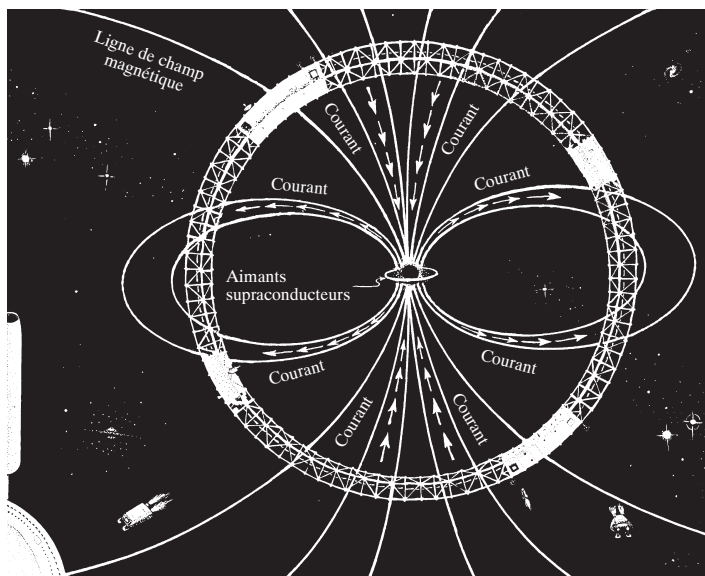
La puissance électrique qui chauffe et éclaire ce monde de l'anneau vient du trou noir : 20 % de l'énergie de masse du trou est stockée dans le tourbillon de l'espace à l'extérieur de l'horizon<sup>42</sup>. Cela représente dix mille fois plus d'énergie que n'en rayonnera le Soleil au cours de toute son existence ! Comme cette énergie se trouve en dehors de l'horizon, on peut l'extraire. Même si l'anneau-monde ne parvient à soutirer cette énergie qu'avec une efficacité de 50 %, il disposera encore de cinq mille fois plus d'énergie que le Soleil.

L'extracteur d'énergie fonctionne sur le même principe que certains quasars<sup>43</sup> : votre équipage a tissé un champ magnétique à travers l'horizon du trou, et il l'y maintient malgré sa tendance à s'en décrocher grâce à d'immenses aimants supraconducteurs (figure P.6). En tournant, l'horizon entraîne l'espace près de lui dans un tourbillon, qui interagit à son tour avec le champ magnétique pour former un gigantesque générateur de courant. Les lignes du champ magnétique servent de lignes de transmission pour ce courant, qui sort de l'équateur du trou (sous la forme d'électrons qui y pénètrent), suit les lignes de champ jusqu'à l'anneau-monde, où il dépose son énergie puis repart sur d'autres lignes de champ jusqu'aux pôles nord et sud du trou (sous la forme de positrons qui y pénètrent). En ajustant la puissance du champ magnétique, les habitants de ce monde ajustent la puissance recueillie : un champ faible et une faible puissance les premières années, un champ fort et une grande puissance plus tard. L'extraction de cette énergie ralentit graduellement la rotation du trou, mais il faudra très longtemps pour épuiser l'immense énergie stockée dans sa rotation.

Votre équipage et les générations innombrables qui suivront pourront appeler ce monde artificiel « la maison », et l'utiliser comme base pour de futures explorations de l'Univers. Mais pas vous. Vous désirez revoir la Terre et les amis que vous y avez laissés, des amis qui doivent maintenant être morts depuis 4 milliards d'années. Vous en avez tellement envie que vous êtes prêt

42. Voir les chapitres VII et XI.

43. Voir les chapitres IX et XI.



**P.6** Une ville sur une structure en anneau autour d'un trou noir en rotation, et le système électromagnétique qui permet à cette ville d'extraire son énergie de la rotation du trou.

à risquer le dernier quart de votre vie normale de 200 ans dans une tentative dangereuse et peut-être téméraire pour retourner à l'époque idyllique de votre jeunesse.

Voyager dans le temps en allant vers le futur est facile, comme l'a montré votre périple à la découverte des trous noirs. Mais non le voyage vers le passé. En fait, un tel voyage est peut-être formellement interdit par les lois fondamentales de la physique. Mais Aurore vous parle de spéculations remontant au  $xx^e$  siècle selon lesquelles un voyage dans le passé serait peut-être possible grâce à une distorsion hypothétique de l'espace appelée *trou de ver*<sup>44</sup>. Cette distorsion consiste en deux entrées, les *bouches du trou de ver*, qui ressemblent beaucoup à des trous noirs mais sans horizon, et qui peuvent être très éloignées dans l'espace (figure P.7). Tout ce qui pénètre dans l'une des bouches se retrouve dans un court

44. Voir le chapitre xiv.



**P.7** Les deux bouches d'un trou de ver hypothétique. En entrant d'un côté, on ressort de l'autre en ayant traversé le court tunnel, la « gorge » du trou de ver, qui ne s'étend pas dans notre Univers mais dans l'hyperespace.

tunnel, la *gorge* du trou de ver, qui conduit à l'autre bouche. Le tunnel ne peut pas être vu dans notre espace, car il s'étend dans l'*hyperespace* et non dans l'espace normal. Aurore explique qu'il est possible que le temps évolue différemment dans le trou de ver et dans notre Univers. En traversant le trou de ver dans une direction, par exemple de la bouche gauche à la bouche droite, on peut se retrouver dans le passé de notre Univers, alors qu'en allant dans l'autre direction, de droite à gauche, on irait dans le futur. Un tel trou de ver serait une distorsion temporelle autant que spatiale.

Aurore vous dit que de minuscules trous de ver de ce genre sont imposés par les lois de la gravité quantique<sup>45</sup>. Ces trous de ver sont si petits ( $10^{-35}$  m) que leur existence est éphémère, bien trop brève ( $10^{-43}$  s) pour qu'ils soient utilisables pour voyager dans le temps. Ils apparaissent et disparaissent en un éclair de façon aléatoire, totalement imprévisible, ici, là, n'importe où. Très occasionnellement et très brièvement, un de ces trous de ver aura une bouche aujourd'hui près de l'anneau-monde et l'autre près de la Terre il y a 4 milliards d'années, quand vous êtes parti pour votre

45. Voir les chapitres XIII et XIV

voyage. Aurore propose d'attraper l'un de ces trous de ver scintillants, de l'élargir comme un enfant gonflant un ballon et de le garder ouvert assez longtemps pour le traverser jusqu'au pays de votre enfance.

Mais Aurore vous prévient d'un grave danger. Sans jamais pouvoir la démontrer, les physiciens ont émis la conjecture que, juste avant qu'un trou de ver agrandi devienne une machine à voyager dans le temps, il s'autodétruit en un gigantesque éclair explosif. Ainsi l'Univers se protégerait des paradoxes entraînés par un voyage temporel, tel que celui d'un homme qui retournerait dans le passé pour tuer sa mère avant d'être conçu, ce qui empêcherait sa naissance <sup>46</sup>.

Si la conjecture des physiciens est fautive, Aurore serait alors capable de maintenir ouvert quelques secondes un trou de ver et d'en élargir la gorge pour vous permettre d'y voyager. En attendant à proximité qu'elle l'élargisse et en y plongeant ensuite, vous arriveriez sur la Terre en une fraction de seconde de votre temps propre, à l'époque de votre jeunesse, il y a 4 milliards d'années. Mais si la machine à voyager dans le temps s'autodétruit, vous subirez le même sort. Vous décidez de courir le risque...



Le récit précédent ressemble à de la science-fiction. Et, de fait, c'est en partie le cas : je ne puis garantir qu'il existe un trou noir de 10 masses solaires à proximité de l'étoile Véga, ni un autre de un million de masses solaires au centre de la Voie lactée, ni un autre de 15 000 milliards de masses solaires quelque part dans l'Univers. C'est une fiction spéculative, mais plausible. Je ne puis garantir non plus que les humains développeront une technologie permettant le voyage intergalactique, ni même interstellaire, ou qu'ils sauront construire des anneaux-mondes autour des trous noirs. C'est aussi une fiction spéculative.

D'un autre côté, je puis garantir avec une confiance considérable, mais non totale, que des trous noirs existent dans notre Univers et qu'ils possèdent les propriétés précises décrites dans ce récit. Si vous flottez juste au-dessus de l'horizon d'un trou noir de 15 000 milliards de masses solaires, je garantis que les lois de la physique seront identiques à l'intérieur de votre vaisseau et sur la Terre, et que si vous regardez les cieux autour de vous, vous

46. Voir le chapitre XIV.

verrez l'Univers entier scintiller au sein d'un petit disque de lumière brillante. Je garantis que si vous envoyez une sonde-robot près de l'horizon d'un trou noir en rotation, quelle que soit la puissance de ses moteurs, elle ne pourra se déplacer à une autre vitesse que celle de rotation du trou (270 tr/s dans mon exemple). Je garantis qu'un trou en rotation rapide peut stocker jusqu'à 29 % de sa masse en énergie de rotation, et que cette énergie peut être extraite et utilisée, si l'on est assez intelligent.

Comment puis-je garantir tout cela avec autant d'assurance ? Après tout, je n'ai jamais vu de trou noir. Personne n'en a jamais vu. Les astronomes n'ont trouvé que des indices indirects de leur existence<sup>47</sup> et aucune preuve expérimentale, quelle qu'elle soit, des propriétés détaillées que j'annonce. Comment puis-je avoir l'audace de garantir tant de choses à leur sujet ? Pour une raison simple. Tout comme les lois de la physique prédisent les caractéristiques des marées sur la Terre, l'heure et la hauteur de chaque marée haute et de chaque marée basse, ces lois prédisent aussi sans équivoque, si nous les comprenons bien, les caractéristiques des trous noirs. La description des lois de la physique donnée par Newton permet de déduire, par un calcul mathématique, la suite des marées sur la Terre de l'an 1999 ou de l'an 2010. De même, la description des lois de la physique donnée par Einstein (la relativité générale) permet de déduire, par un calcul mathématique, tout ce que l'on peut savoir des propriétés des trous noirs, de ce côté-ci de leur horizon.

Et pourquoi croire que la description des lois fondamentales de la physique donnée par la relativité générale est très précise ? Après tout, nous savons que la description de Newton cesse de l'être à proximité d'un trou noir.

Les descriptions des lois fondamentales qui réussissent contiennent en elles-mêmes une forte indication de l'endroit où elles cessent de s'appliquer<sup>48</sup>. La description de Newton nous dit qu'elle ne s'appliquera probablement plus à proximité d'un trou noir (bien que nous n'ayons su le déchiffrer qu'au xx<sup>e</sup> siècle). La relativité générale présente de la même manière une totale confiance en elle à l'extérieur de l'horizon d'un trou noir, sur l'horizon et à l'intérieur, tout au long du chemin jusqu'à la singularité, ou presque. C'est une des choses qui me donnent confiance dans les prédictions de la relativité générale. Une autre

47. Voir les chapitres VIII et IX.

48. Voir la dernière section du chapitre I.

chose est le fait que, si les prédictions concernant les trous noirs n'ont pas encore été testées directement, il y a eu des vérifications très précises d'autres aspects de la relativité générale, sur la Terre, dans le système solaire et dans des systèmes binaires contenant des étoiles exotiques et compactes appelées des pulsars. La relativité générale a passé tous ces tests pavillon haut.

Au cours des trente dernières années, j'ai participé à la quête de la physique théorique qui a conduit à notre compréhension actuelle des trous noirs, et à la quête de l'astronomie pour vérifier ces prédictions par des observations. Mes propres contributions furent modestes, mais avec mes collègues physiciens et astronomes je me suis délecté de l'excitation de la quête, et je me suis émerveillé de la compréhension qu'elle nous a apportée. Ce livre est ma tentative pour transmettre un peu de cette excitation et de cet émerveillement à tous ceux qui ne sont experts ni en astronomie ni en physique.



# 1

---

## La relativité de l'espace et du temps

*Où Einstein détruit la conception  
de Newton selon laquelle l'espace  
et le temps sont des absolus.*

Professeur Wilhelm Ostwald  
Université de Leipzig  
Leipzig, Allemagne

le 13 avril 1901

Monsieur le Professeur,

Veillez, s'il vous plaît, pardonner à un père qui a l'audace de se tourner vers vous, Monsieur le Professeur, dans l'intérêt de son fils

Je commencerai par vous dire que mon fils Albert a vingt-deux ans, qu'il a étudié à l'Institut polytechnique de Zurich pendant quatre ans, et qu'il a obtenu haut la main son diplôme en mathématiques et en physique l'été dernier. Depuis, il a essayé sans succès d'obtenir un poste d'assistant qui lui aurait permis de poursuivre ses études de physique théorique et expérimentale. Tous ceux qui sont en situation de porter un jugement sur lui louent très haut ses capacités. En tout état de cause, je puis vous assurer qu'il est extrêmement studieux et travailleur et qu'il fait preuve d'un attachement passionné à la science.

Mon fils ressent donc douloureusement son manque actuel de poste, et la pensée que sa carrière est partie dans une mauvaise direction et qu'il n'est plus au courant de rien est chaque jour plus profondément ancrée. Il est de plus accablé par l'idée qu'il est une lourde charge pour nous, qui sommes des gens modestes.

Comme c'est vous, Monsieur le Professeur, que mon fils honore, admire et estime plus que toute autre personne exerçant dans le domaine de la physique, c'est à vous que j'ai pris la liberté de

m'adresser avec la très humble requête de bien vouloir lire son article publié dans les *Annalen für Physik* et de lui écrire, si possible, quelques mots d'encouragement pour qu'il retrouve peut-être sa joie de vivre et de travailler.

Si de plus vous pouviez lui obtenir un poste d'assistant pour l'automne prochain, ma gratitude ne connaîtrait plus de limite.

Je vous prie encore une fois de bien vouloir pardonner l'impudence que je mets à vous écrire, et je me permets également de préciser que mon fils ignore tout de ma démarche inhabituelle.

Je reste, Monsieur le Professeur, votre dévoué

Hermann Einstein

C'était effectivement une période de déprime pour Albert Einstein. Il était sans travail depuis huit mois, depuis qu'il avait obtenu à vingt et un ans son diplôme de l'Institut polytechnique de Zurich, et il considérait sa vie comme un échec.

A l'Institut polytechnique (souvent appelé ETH d'après ses initiales en allemand), Einstein avait étudié sous la direction de certains des physiciens et mathématiciens les plus réputés, mais il ne s'était pas bien entendu avec eux. Dans le monde académique du tournant du siècle, où la plupart des Professeurs (avec un P majuscule) exigeaient et attendaient le respect, Einstein manquait de souplesse. Depuis l'enfance, il se rebellait contre l'autorité, posant toujours des questions et n'acceptant aucune réponse sans en vérifier lui-même la validité. « Le respect irréfléchi pour l'autorité est le plus grand ennemi de la vérité », affirmait-il. Heinrich Weber, le plus célèbre de ses deux professeurs de physique à l'ETH, se plaignait avec exaspération : « Vous êtes un garçon brillant, Einstein, très brillant. Mais vous avez un grave défaut : vous ne supportez pas que l'on vous dise quoi que ce soit. » Son autre professeur de physique, Jean Pernet, lui demanda pourquoi il n'étudiait pas la médecine, le droit ou la philologie plutôt que la physique. « Faites ce que vous voulez, disait Pernet, mais je vous aurai prévenu dans votre propre intérêt. »

Einstein n'arrangeait rien par son attitude décontractée vis-à-vis des cours. « Il fallait se fourrer tout ça dans le crâne pour les examens, que cela plaise ou non », dira-t-il plus tard. Son professeur de mathématiques, Hermann Minkowski, dont nous parlerons beaucoup au chapitre II, était si dérouté par l'attitude d'Einstein qu'il le qualifiait de « chien paresseux ».

Mais Einstein n'était pas paresseux, seulement sélectif. Il absorbait en profondeur certains cours et ignorait les autres, préférant

utiliser son temps à étudier ce qui l'intéressait et à réfléchir. Réfléchir était amusant, agréable et satisfaisant : par lui-même, il pouvait apprendre la physique « nouvelle », cette physique qu'Heinrich Weber omettait dans tous ses cours.

### *L'espace et le temps absolus de Newton, et l'éther*

La « vieille » physique, celle qu'Einstein *pouvait* apprendre dans les cours de Weber, formait un grand ensemble de connaissances que j'appellerai *newtonien*, non pas parce que Isaac Newton en était entièrement responsable (ce n'était pas le cas), mais parce que ses fondations furent posées par Newton au XVII<sup>e</sup> siècle.

A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, tous les phénomènes disparates de l'Univers physique pouvaient s'expliquer élégamment par une poignée de lois newtoniennes simples. Par exemple, tous les phénomènes impliquant la gravitation s'expliquaient par les lois de Newton sur le mouvement et la gravitation :

- Tout objet se déplace en ligne droite à vitesse constante, sauf si une force agit sur lui.
- Quand une force agit sur lui, la vitesse de l'objet change à un rythme proportionnel à la force et inversement proportionnel à sa masse.
- Entre deux objets quelconques de l'Univers, il existe une force gravitationnelle proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de leur séparation.

En manipulant mathématiquement <sup>1</sup> ces trois lois, les physiciens du XIX<sup>e</sup> siècle expliquaient les orbites des planètes autour du Soleil, le flux et le reflux des marées océaniques et la chute des pierres. Ils pouvaient même peser le Soleil et la Terre. De même, en manipulant un ensemble simple de lois de l'électricité et du magnétisme, ils pouvaient expliquer les éclairs, les aimants, les ondes radio et la propagation, la diffraction et la réflexion de la lumière.

La gloire et la fortune attendaient ceux qui pouvaient obtenir des lois de Newton de nouvelles technologies. En manipulant les

1. Les lecteurs qui souhaiteraient comprendre ce que signifie « en manipulant mathématiquement » les lois de la physique trouveront une discussion dans les notes figurant à la fin de ce livre.

lois de Newton sur la chaleur, James Watt trouva comment convertir une machine à vapeur primitive inventée par d'autres en un dispositif pratique qui porte désormais son nom. En s'appuyant fortement sur la description des lois de l'électricité et du magnétisme donnée par Joseph Henry, Samuel Morse conçut sa version rentable du télégraphe.

Les inventeurs comme les physiciens tiraient fierté de la perfection de leur compréhension de la nature. Tout dans les cieux et sur Terre semblait obéir aux lois newtoniennes de la physique, et la maîtrise de ces lois apportait aux hommes la maîtrise de leur environnement, et apporterait peut-être un jour la maîtrise de l'Univers entier.

Einstein pouvait donc apprendre toutes ces vieilles lois bien établies, et leurs applications technologiques, dans les cours de Heinrich Weber, et les apprendre bien. De fait, pendant ses premières années à l'ETH, Einstein était enthousiaste au sujet de son professeur. Il écrivit en février 1898 à la seule femme de sa classe à l'ETH, Mileva Maric, dont il était amoureux : « Weber a fait un cours magnifique. J'attends avec impatience chacune de ses leçons. »

Mais au cours de sa quatrième année à l'ETH, Einstein devint très mécontent. Weber ne parlait que de la vieille physique et ignorait complètement certains des plus importants développements des dernières décennies, y compris la découverte par James Clerk Maxwell d'un nouvel ensemble d'élégantes lois de l'électromagnétisme permettant de déduire *tous* les phénomènes comme le comportement des aimants, les étincelles électriques, les circuits électriques, les ondes radio, la lumière. Einstein dut apprendre seul les lois unificatrices de Maxwell en lisant les livres modernes écrits par des physiciens d'autres universités, et il n'hésita sans doute pas à faire part à Weber de son mécontentement. Ses relations avec lui se dégradèrent.

Rétrospectivement, il est clair que la plus importante de toutes les choses que Weber ignorait dans ses cours était l'indice de plus en plus net de fissures dans les fondations de la physique de Newton, fondations dont les briques et le ciment étaient les conceptions newtoniennes selon lesquelles l'espace et le temps sont des absolus.

L'*espace absolu* de Newton était l'espace de l'expérience quotidienne avec ses trois dimensions : est-ouest, nord-sud, haut-bas. Il était évident à partir de cette expérience quotidienne qu'il y

avait un et un seul espace de ce type. C'est l'espace que se partagent toute l'humanité, le Soleil, les planètes et toutes les étoiles. Nous nous déplaçons tous dans cet espace, chacun à notre façon et à notre vitesse, et, indépendamment de notre mouvement, nous l'appréhendons tous de la même manière. Cet espace nous donne nos sensations de longueur, de largeur et de hauteur, et, selon Newton, nous nous accordons tous sur la longueur, la largeur et la hauteur d'un objet quel que soit notre mouvement, pour autant que nos mesures soient assez précises.

Le *temps absolu* de Newton était le temps de l'expérience quotidienne, le temps qui coule inexorablement à mesure que nous vieillissons, le temps que mesurent les horloges de bonne qualité, la rotation de la Terre et le mouvement des planètes. C'est un temps dont le cours est une expérience commune à toute l'humanité, au Soleil, aux planètes et à toutes les étoiles. Selon Newton, nous nous accordons tous sur la période d'une orbite planétaire ou sur la durée du discours d'un homme politique, pour autant que nous utilisions tous des horloges assez précises pour mesurer cette période ou ce discours.

Si les conceptions newtoniennes de l'espace et du temps devaient vaciller, tout l'édifice des lois physiques de Newton s'effondrerait. Fort heureusement, année après année, décennie après décennie, siècle après siècle, les conceptions fondatrices de Newton avaient résisté, produisant les uns après les autres des triomphes scientifiques, du domaine des planètes au domaine de l'électricité ou à celui de la chaleur. Il n'y eut aucun signe de fissure dans les fondations jusqu'en 1881, quand Albert Michelson commença à mesurer la vitesse de propagation de la lumière.

Il semblait évident, et les lois de Newton l'exigeaient, que si l'on mesurait la vitesse de la lumière ou celle de tout autre objet, le résultat dépendrait de la façon dont on se déplaçait. Si l'on est immobile dans l'espace absolu, la vitesse de la lumière doit être la même dans toutes les directions. Si au contraire on se déplace dans l'espace absolu, mettons vers l'est, alors on doit observer que la lumière se dirigeant vers l'est est ralentie et que celle se dirigeant vers l'ouest est accélérée, exactement comme une personne à bord d'un train se dirigeant vers l'est voit les oiseaux volant vers l'est ralentir et les oiseaux volant vers l'ouest accélérer.

Dans le cas des oiseaux, c'est l'air qui règle leur vitesse de vol. Leurs ailes prenant appui sur l'air, les oiseaux d'une même espèce

volent à la même vitesse maximale dans l'air quelle que soit leur direction. Dans le cas de la lumière, c'était une substance appelée *éther* qui en réglait la vitesse, selon les lois de Newton. Ses champs électrique et magnétique prenant appui sur l'éther, la lumière se déplace à la même vitesse universelle à travers l'éther quelle que soit sa direction. Et comme, selon la conception newtonienne, l'éther est au repos dans l'espace absolu, toute personne immobile mesurera la même vitesse dans toutes les directions tandis qu'une personne en mouvement mesurera des vitesses différentes.

Cela dit, la Terre est en mouvement à travers l'espace absolu, ne serait-ce que parce qu'elle tourne autour du Soleil : elle se déplace dans un sens en janvier et dans le sens opposé six mois plus tard, en juin. Par conséquent, nous devrions sur Terre mesurer des vitesses de la lumière différentes dans différentes directions, et ces différences devraient changer avec la saison, bien que faiblement (un dix-millième environ) car la vitesse de la Terre est petite comparée à celle de la lumière.

Vérifier cette prédiction était un défi fascinant pour des physiciens expérimentateurs. Albert Michelson, un Américain de vingt-huit ans, releva le défi en 1881 en utilisant une technique expérimentale de son invention d'une extraordinaire précision (qu'on appelle maintenant l'« interférométrie de Michelson »)<sup>2</sup>. Mais malgré tous ses efforts, Michelson ne put trouver le moindre indice d'une quelconque variation de la vitesse de la lumière avec la direction. La vitesse était la même dans toutes les directions et en toute saison dans l'expérience initiale de 1881, à Potsdam, en Allemagne, et encore dans celle beaucoup plus précise qu'il entreprit en 1887 avec un chimiste, Edward Morley, à Cleveland, dans l'Ohio. Michelson réagit à sa découverte avec un mélange d'exaltation et de consternation en pensant aux conséquences. Comme la plupart des physiciens de l'époque, Weber réagit avec scepticisme.

Il était facile d'être sceptique. Les expériences intéressantes sont souvent terriblement difficiles, si difficiles en fait que, même en les exécutant avec le plus grand soin, elles peuvent donner des résultats faux. La moindre anomalie dans l'appareillage, une minuscule fluctuation de température non contrôlée, une vibration inattendue dans le sol qui le soutient, peut fausser le résultat final. Il n'est donc pas surprenant que les physiciens d'aujourd'hui tout

2. Voir le chapitre x.

comme ceux de 1890 soient confrontés à des expériences très délicates, qui sont en conflit les unes avec les autres ou en conflit avec nos conceptions les plus chères sur la nature de l'Univers et de ses lois physiques. Parmi les exemples récents, citons les expériences prétendant avoir découvert une « cinquième force » (une force absente des lois traditionnelles qui connaissent un grand succès) et d'autres expériences réfutant cette affirmation. Citons aussi les expériences annonçant la découverte de la « fusion froide » (un phénomène interdit par les lois traditionnelles, si les physiciens les comprennent correctement) et d'autres expériences niant la fusion froide. Presque toujours, les expériences qui contredisent nos croyances les plus chères sont fausses : leurs résultats radicaux résultent d'erreurs expérimentales. Pourtant, il arrive qu'elles soient justes et qu'elles ouvrent la voie à une révolution dans notre compréhension de la nature.

La marque d'un physicien hors pair est sa capacité à « sentir » à quelles expériences il faut faire confiance et quelles sont celles qui doivent être rejetées, quelles sont celles dont on doit se préoccuper et celles que l'on peut ignorer. L'amélioration des techniques et la répétition des expériences permettent finalement à la vérité de se faire jour, mais si quelqu'un veut contribuer au progrès de la science et placer son imprimatur sur des découvertes majeures, il lui faut deviner au plus tôt à quelles expériences se fier.

Plusieurs physiciens exceptionnels des années 1890 examinèrent l'expérience de Michelson et Morley, et ils conclurent que les détails de celle-ci et le grand soin apporté à son exécution en faisaient un candidat sérieux. Cette expérience « sentait bon », décidèrent-ils, et il y avait sans doute quelque chose de faux dans les fondations de la physique newtonienne. Au contraire, Heinrich Weber et la plupart des autres étaient sûrs qu'avec du temps et un peu d'effort expérimental tout rentrerait dans l'ordre et que la physique newtonienne triompherait à la fin comme elle l'avait déjà fait tant de fois. Il était donc inapproprié ne fût-ce que de mentionner cette expérience dans les cours de l'université : il ne fallait pas égarer les jeunes âmes.

Le physicien irlandais George Fitzgerald fut le premier à prendre l'expérience de Michelson et Morley pour argent comptant et à réfléchir à ce qu'elle impliquait. En la comparant à d'autres expériences, il arriva à la conclusion radicale que l'erreur venait de la compréhension qu'avaient les physiciens du concept de « longueur », et qu'il y avait par conséquent quelque chose de

faux dans la conception de l'espace absolu. En 1889, il écrivait dans un bref article de la revue américaine *Science* :

J'ai lu avec beaucoup d'intérêt l'expérience merveilleusement délicate de MM. Michelson et Morley. [...] Leurs résultats semblent à l'opposé d'autres expériences. [...] Je suggérerais que la seule hypothèse peut-être qui les réconcilierait serait que la longueur des corps matériels change quand ils se déplacent à travers l'éther [à travers l'espace absolu], d'une quantité qui dépend de la racine carrée du rapport entre leur vitesse et celle de la lumière.

Une très faible contraction de la longueur (5 milliardièmes) dans la direction du mouvement de la Terre permettait en effet d'expliquer le résultat nul de l'expérience de Michelson et Morley. Mais cela exigeait un rejet de la compréhension qu'avaient les physiciens du comportement de la matière : aucune force connue ne pouvait faire se contracter les objets dans la direction de leur mouvement, même d'une quantité aussi faible. Si les physiciens comprenaient correctement la nature de l'espace et la nature des forces moléculaires à l'intérieur des corps solides, alors des corps solides en mouvement uniforme devaient toujours conserver la même taille et la même forme par rapport à l'espace absolu, quelle que soit leur vitesse.

A Amsterdam, Hendrik Lorentz prit aussi l'expérience de Michelson et Morley au sérieux, comme il prit au sérieux la suggestion de Fitzgerald sur la contraction des objets en mouvement. Apprenant cela, Fitzgerald lui écrivit sa joie (« On s'est beaucoup moqué de moi ici », affirmait-il). A la recherche d'une compréhension plus profonde, Lorentz – comme d'ailleurs, de façon autonome, Henri Poincaré à Paris et Joseph Larmor à Cambridge – réexamina les lois de l'électromagnétisme et remarqua une particularité qui se raccordait à l'idée de Fitzgerald de contraction des longueurs.

Si l'on exprimait les lois de l'électromagnétisme de Maxwell en termes de champs électrique et magnétique mesurés au repos dans l'espace absolu, ces lois prenaient une forme mathématique particulièrement simple et belle. Par exemple, l'une d'elles disait simplement : « Vues par une personne au repos dans l'espace absolu, les lignes de champ magnétique n'ont pas d'extrémité » (voir les figures 1.1a et b). En revanche, si l'on exprimait ces lois en termes de champs légèrement différents vus par une personne en mouvement, elles devenaient beaucoup plus compliquées et



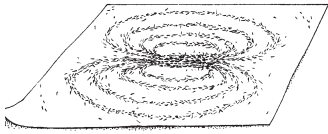
laides. En particulier, la loi « pas d'extrémité » devenait : « Vues par une personne en mouvement, la plupart des lignes de champ magnétique n'ont pas d'extrémité mais certaines sont coupées par le mouvement et acquièrent ainsi des extrémités. De plus, quand la personne en mouvement bouge l'aimant, de nouvelles lignes de champ sont coupées, puis se ressoudent, puis sont à nouveau coupées, puis se ressoudent » (voir la figure 1.1c).

La nouvelle découverte mathématique de Lorentz, de Poincaré et de Larmor était une façon de rendre belles les lois électromagnétiques vues par une personne en mouvement, de les rendre identiques en fait aux lois vues par une personne immobile dans l'espace absolu : « Les lignes de champ magnétique n'ont jamais d'extrémité en quelque circonstance que ce soit. » On pouvait mettre les lois sous cette forme élégante en prétendant, contrairement aux préceptes de Newton, que tous les objets en mouvement sont contractés dans le sens de leur mouvement de la quantité dont Fitzgerald avait précisément besoin pour expliquer l'expérience de Michelson et Morley !

Si la contraction de Fitzgerald avait été la seule « nouvelle physique » dont on avait besoin pour rendre les lois de l'électromagnétisme universellement simples et belles, Lorentz, Poincaré et Larmor, avec leur foi intuitive que les lois de la physique *devaient* être belles, auraient pu laisser de côté les préceptes newtoniens et croire fermement en cette contraction. Mais celle-ci n'était pas suffisante par elle-même. Pour rendre belles les lois, il fallait aussi prétendre que le temps s'écoule plus lentement pour quelqu'un en mouvement dans l'Univers que pour quelqu'un au repos : le mouvement « dilate » le temps.

Mais les lois de la physique de Newton ne laissaient aucune place au doute : le temps est *absolu*. Il coule de manière uniforme et inexorable au même rythme universel, indépendamment du mouvement. Si les lois de Newton étaient correctes, le mouvement ne pouvait pas plus causer une dilatation du temps qu'une contraction des longueurs. Malheureusement, les horloges étaient bien trop imprécises en 1890 pour révéler la vérité, et devant les triomphes scientifiques et technologiques de la physique newtonienne, triomphes profondément ancrés dans la notion de temps absolu, personne ne pouvait soutenir avec conviction que le temps se dilate réellement. Lorentz, Poincaré et Larmor parlaient en l'air.

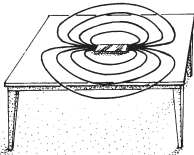
Einstein, alors étudiant à Zurich, n'était pas encore prêt à s'attaquer à des questions aussi vertigineuses, mais il commençait à y penser. A son amie Mileva Maric – leur idylle s'épanouis-



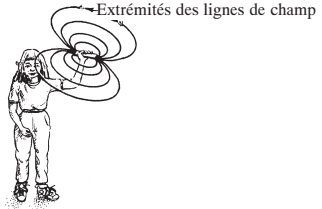
(a)



(b) Au repos dans l'espace absolu



(c) Sur la Terre en mouvement



**Figure 1.1** Une des lois de Maxwell de l'électromagnétisme, telle qu'on la comprenait dans le cadre de la physique newtonienne du XIX<sup>e</sup> siècle :

a) Le concept de ligne de champ magnétique : quand on place un barreau aimanté sous une feuille de papier et que l'on répand de la limaille de fer sur cette feuille, elle marque le dessin des lignes de champ de l'aimant. Chaque ligne quitte l'aimant au pôle nord, dessine une boucle autour de l'aimant, y pénètre à nouveau au pôle sud, traverse le barreau jusqu'au pôle nord, où elle se referme. La ligne de champ est donc une courbe fermée sans extrémité, comme un élastique. L'affirmation que « les lignes de champ magnétique n'ont pas d'extrémité » est la loi de Maxwell dans sa forme la plus simple et la plus belle ;

b) Selon la physique de Newton, cette affirmation est correcte quoi qu'on fasse subir à l'aimant (le secouer violemment par exemple) à condition d'être au repos dans l'espace absolu. Les lignes de champ magnétique n'ont jamais d'extrémité pour quelqu'un au repos ;

c) Pour quelqu'un suivant le mouvement de la Terre à travers l'espace, la loi de Maxwell est beaucoup plus compliquée selon la physique newtonienne. Si l'aimant examiné par la personne en mouvement est tranquillement posé sur une table, alors certaines de ses lignes de champ (une sur cent millions) auront une extrémité. Si la personne agite l'aimant violemment, d'autres lignes (une sur mille milliards) seront temporairement coupées par cette agitation avant de se ressouder, puis de se recouper, puis de se ressouder. Bien qu'une ligne de champ sur cent millions ou sur mille milliards soit une proportion trop faible pour être observée par n'importe quelle expérience de physique au XIX<sup>e</sup> siècle, le fait que les lois de Maxwell prévoyaient une telle chose semblait plutôt compliqué et inesthétique à Lorentz, à Poincaré et à Larmor.

sait –, il écrivait en août 1899 : « Je suis de plus en plus convaincu que l'électrodynamique des corps en mouvement, telle qu'elle est présentée aujourd'hui, n'est pas correcte. » Au cours des six années suivantes, pendant que sa puissance de physicien arrivait à maturité, il devait réfléchir au sujet et examiner la réalité de la contraction des longueurs et de la dilatation du temps.

Weber ne montrait au contraire aucun intérêt pour ces questions spéculatives. Il continuait sans faille à enseigner la physique de Newton comme si tout était parfaitement en ordre, comme si aucune fissure n'était apparue dans les fondations de la physique.

Approchant de la fin de ses études à l'ETH, Einstein supposait naïvement que, parce qu'il était intelligent et qu'il ne s'était pas trop mal débrouillé aux cours (avec une note d'ensemble de 4,91 sur 6), on lui offrirait un poste d'assistant de physique à l'ETH, sous la direction de Weber, et qu'il pourrait l'utiliser comme tremplin vers le monde universitaire, comme c'était l'habitude. En tant qu'assistant, il pourrait commencer à faire des recherches personnelles, conduisant en quelques années à un doctorat.

Mais rien de tel n'arriva. Des quatre étudiants qui passèrent leurs examens finals dans le programme combiné de physique et de mathématiques en août 1900, trois reçurent un poste d'assistant à l'ETH sous la direction de mathématiciens, et le quatrième, Einstein, ne reçut rien. Weber engagea comme assistants deux étudiants en ingénierie plutôt qu'Einstein.

Ce dernier tenta à nouveau sa chance. En septembre, un mois après son diplôme, il postula un emploi vacant d'assistant en mathématiques à l'ETH. Sa demande fut rejetée. Au cours de l'hiver et du printemps, il s'adressa à Wilhelm Ostwald à Leipzig, en Allemagne, et à Heike Kamerlingh Onnes à Leyde, aux Pays-Bas. Il semble qu'il n'ait jamais reçu d'eux ne serait-ce qu'une réponse polie, bien que sa lettre à Kamerlingh Onnes soit fièrement affichée aujourd'hui dans un musée de Leyde, et bien que dix ans plus tard Ostwald ait été le premier à proposer Einstein pour le prix Nobel. Même la lettre du père d'Einstein à Ostwald ne semble pas avoir reçu de réponse.

A l'effrontée et volontaire Mileva Maric, avec qui l'idylle devenait plus sérieuse, Einstein écrivait le 27 mars 1901 : « Je suis absolument convaincu que c'est Weber le responsable... Cela ne sert à rien d'écrire à d'autres professeurs car ils s'adresseront sûrement à Weber pour s'informer sur moi à un moment ou à un autre, et il fera une autre mauvaise recommandation. » A un ami proche,

Marcel Grossmann, il écrivait le 14 avril de la même année : « Il y a longtemps que j'aurais obtenu [un poste d'assistant] si Weber n'avait pas agi en sous-main. Cela ne fait rien, je remue ciel et terre et je n'abandonne pas mon sens de l'humour... Dieu a créé l'âne et lui a donné la peau épaisse. »

Il avait bien besoin d'une peau épaisse car non seulement il cherchait sans succès un emploi, mais en plus ses parents étaient farouchement opposés à son mariage avec Mileva, et ses relations avec elle devenaient houleuses. Sa mère écrivait à propos de la jeune femme : « Cette mademoiselle Maric est la cause des moments les plus amers de ma vie, et si cela était en mon pouvoir, je la bannirais de notre horizon, elle me déplaît vraiment. » Et Mileva écrivait au sujet de la mère d'Einstein : « Cette dame semble vraiment avoir pour but dans la vie d'empoisonner autant que possible non seulement ma vie mais aussi celle de son fils. [...] Je n'aurais jamais cru qu'il puisse exister des gens aussi dénués de cœur et si totalement méchants ! »

Einstein voulait désespérément échapper à sa dépendance financière vis-à-vis de ses parents, et avoir la tranquillité d'esprit et la liberté de consacrer son énergie à la physique. Peut-être pouvait-il arriver à ce but autrement que par un poste d'assistant à l'université. Son diplôme de l'ETH lui permettait d'enseigner dans un lycée, aussi se tourna-t-il dans cette direction : il parvint à la mi-mai 1901 à obtenir un poste provisoire dans un lycée technique de Winterthur, en Suisse, en remplacement d'un professeur de mathématiques qui devait effectuer son service militaire.

A son ancien professeur d'histoire à l'ETH, Alfred Stern, il écrivit : « Je suis fou de joie à propos [de ce poste d'enseignant] car j'ai appris aujourd'hui que tout était définitivement arrangé. Je n'ai pas la moindre idée de qui peut être la bonne âme qui m'a recommandé, car, à ce que l'on m'a dit, je ne suis dans les petits papiers d'aucun de mes anciens professeurs. » Le poste de Winterthur fut suivi à l'automne 1901 par un emploi similaire à Schaffhouse ; puis en juin 1902 une place de « expert technique de troisième classe » à l'Office fédéral des brevets à Berne, toujours en Suisse, lui donna l'indépendance et la stabilité.

Malgré les turbulences de sa vie privée (une longue séparation d'avec Mileva, un fils illégitime en 1902, qu'ils semblent avoir confié à l'adoption, peut-être pour protéger les possibilités de carrière d'Einstein dans la sage Suisse, son mariage un an plus tard avec Mileva malgré l'opposition violente de ses parents), Einstein