

Comment construire une machine à explorer le temps ?

PAUL DAVIES

TRADUCTION DE CAROLINE LEPAGE

ILLUSTRATIONS DE THOMAS HAESSIG



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Édition originale en anglais : *How to Build a Time Machine*

Copyright © Orion Productions, 2001

Copyright © Paul Davies, 2001

Traduction française © EDP Sciences, 2007

Conception de la maquette et de la couverture : Zoé Production

Illustration de couverture : Thomas Haessig

Imprimé en France

ISBN : 978-2-86883-941-1

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droits ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2007

*Je tiens à remercier les nombreuses
personnes qui m'ont aidé à réaliser
cet ouvrage, en particulier mes collègues
Gerard Milburn, Lee Smolin, Peter Szekeres,
Andrew White et David Wiltshire
ainsi que mon agent John Brockman
et mon éditeur Stefan McGrath.*

SOMMAIRE

Bref historique du voyage dans le temps	7
Avant-propos	9
Chapitre 1. Comment visiter le futur ?	13
Temps et mouvement	14
Comment utiliser la gravitation pour voyager vers le futur ?	22
Est-ce vraiment le temps qui ralentit ?	26
$E = mc^2$: la célèbre équation d'Einstein	27
Le futur est ailleurs	29
Chapitre 2. Comment visiter le passé ?	37
Comment voyager plus vite que la lumière ?	38
Comment fabriquer un trou noir ?	40
Trous de ver et espace courbe	46
Espace-temps courbe	51
Trous de ver : portails vers un autre univers ?	55
Comment produire un trou de ver traversable ?	59
Chapitre 3. Comment construire une machine à explorer le temps ?	69
Le collisionneur	71
L'imploseur	76
Le dilatateur	79
Autres systèmes de dilatation	84
Le différenciateur	87
Chapitre 4. Comment donner un sens à tout ça ?	91
Comment éviter les touristes temporels ?	92
Les paradoxes du temps	93
Comment former un autre univers ?	102
Protection de la chronologie	108
Modèles alternatifs de machines à explorer le temps	111
Inverser le temps	114
Pourquoi étudier le voyage dans le temps ?	116

BREF HISTORIQUE DU VOYAGE DANS LE TEMPS

- 1895 H. G. Wells publie *La Machine à explorer le temps*.
- 1905 Albert Einstein publie la théorie de la relativité restreinte (prédiction de la dilatation du temps).
- 1908 Selon Einstein, la gravitation ralentit le temps.
- 1915 Einstein publie la théorie de la relativité générale.
- 1916 Karl Schwarzschild présente une solution aux équations de la relativité générale (trou noir/trou de ver).
- 1916 À partir de la solution de Schwarzschild, Ludwig Flamm est le premier à évoquer la possibilité du trou de ver.
- 1917 Einstein suppose l'existence d'une force de répulsion cosmique (première hypothèse au sujet de l'antigravité).
- 1934 Les trous noirs seraient issus de l'effondrement d'étoiles...
- 1935 Évocation du pont d'Einstein-Rosen (trou de ver).
- 1937 W. J. van Stockum est le premier à découvrir une solution « boucles temporelles » aux équations d'Einstein.

- 1948 L'univers en rotation de Kurt Gödel permet le voyage dans le temps.
- 1948 Découverte de l'effet Casimir, c'est la première fois que l'on parle d'énergie négative.
- 1957 John Wheeler suppose l'existence des trous de ver.
- 1957 Hugh Everett III propose la théorie des univers multiples ou mondes parallèles (interprétation de la mécanique quantique).
- 1963 La série *Docteur Who* démarre sur la chaîne TV de la BBC.
- 1963 Roy Kerr comprend que les trous noirs en rotation pourraient contenir des boucles temporelles.
- 1974 Cygnus X-1, découvert par un satellite d'observation de rayons X, est le premier candidat au titre de trou noir.
- 1976 Franck Tipler montre que le voyage temporel est possible près des cylindres infiniment longs en rotation.
- 1977 Les trous noirs en rotation, portes d'entrée vers d'autres univers...
- 1985 Sortie au cinéma du film *Retour vers le futur*.
- 1985 Carl Sagan écrit *Contact*.
- 1989 Kip Thorne lance une étude sur l'utilisation des trous de ver pour voyager dans le temps.
- 1990 Stephen Hawking développe la conjecture de protection chronologique.
- 1991 J. Richard Gott III propose d'explorer le temps à l'aide des cordes cosmiques.
- 1999 Publication de *Prisonniers du temps*, roman de Michael Crichton.

AVANT-PROPOS

Le voyage dans le temps est inconcevable.

Kingsley Amis

Je crains de ne pas parvenir à exprimer les étranges sensations éprouvées lors du voyage dans le temps.

Elles sont extrêmement désagréables.

H. G. Wells

Et s'il était possible de construire une machine capable de transporter un être humain dans le temps ! Première chose, ce scénario est-il crédible ?

Il y a une centaine d'années, peu de gens pensaient qu'il serait un jour possible d'envoyer l'homme dans l'espace. Le voyage dans l'espace, et celui dans le temps, relevaient seulement de la science-fiction. Pourtant, aujourd'hui, les vols spatiaux sont monnaie courante. Peut-être demain en sera-t-il de même pour les voyages temporels ?

Voyager dans le temps, voilà une idée facile à envisager. Il suffit d'entrer dans une machine à voyager dans le temps, de

presser sur quelques boutons, puis d'en ressortir pour se retrouver *quelque part* ailleurs, et surtout, à une autre époque! Les auteurs de science-fiction ont exploité le filon, encore et encore, depuis la publication du célèbre roman de H. G. Wells, *La Machine à explorer le temps*, en 1895. Ainsi, les aventures dans le temps du Docteur Who et de ses séduisantes partenaires ont tenu en haleine le public britannique, et l'auteur lui-même. Par la suite, des films hollywoodiens – *Retour vers le futur* par exemple – ainsi que des livres comme *Prisonniers du temps*, ont presque fait passer ce genre d'expéditions pour un jeu d'enfants.

Alors, est-ce le cas? Le voyage dans le temps est-il ou non une possibilité scientifique?

Avouons qu'y penser un instant soulève de nombreuses et épineuses questions! Où se trouvent exactement le passé et le futur? Le premier, ayant disparu, est très certainement impossible à récupérer, alors que le second lui ne s'est pas encore produit... Et comment peut-on se rendre dans un monde qui n'existe pas? Mettons un instant ces considérations de côté. Que penser ensuite des inévitables paradoxes liés au risque de visiter le passé et de le modifier? Quelles conséquences pour le présent? Et si explorer le temps était effectivement possible, où sont tous les touristes venus du futur pour observer avec curiosité la société du XXI^e siècle?

Bref, aucun doute: le voyage dans le temps pose de sérieux problèmes, y compris aux physiciens pourtant habitués à travailler sur des concepts aussi mystérieux que l'antimatière et les trous noirs. Mais peut-être que tout cela semble bien confus parce que notre vision du temps n'est pas la bonne? Après tout, elle a déjà considérablement évolué au fil des siècles. Dans les cultures anciennes, le temps était associé au changement. Il prenait racine dans les cycles et les rythmes de la nature.

Plus tard, Sir Isaac Newton en donne une vision plus abstraite et mécanique : « Le temps absolu, vrai et mathématique, coule uniformément sans relation à rien d'extérieur. » Cette définition représentera un concept du temps accepté par la communauté scientifique pendant près de deux cents ans...

Chacun suppose, sans se poser de question (peu importe d'ailleurs sa définition favorite du temps) que le temps est le même partout et pour tout le monde. En d'autres termes, qu'il est absolu et universel. En effet, il nous arrive de *sentir* le temps s'écouler différemment selon notre humeur, pourtant le temps reste simplement *le* temps. Et le but d'une horloge est d'éviter ces déformations mentales en enregistrant en toute impartialité le temps qui passe. De ce point de vue, le temps peut être « découpé » en trois : passé, présent et futur. Le présent – *maintenant* – est supposé représenter l'instant bref de la réalité vécue. Le passé, lui, fait partie de l'histoire comme une sorte de mémoire. Quant au futur, il est encore flou, informe... Pour en revenir à ce « maintenant » – essentiel – lui est considéré représenter le même instant à travers l'univers : votre « maintenant » et le mien sont identiques, peu importe l'endroit où nous sommes et ce que nous faisons.

Voilà donc ce qu'est le temps pour le sens commun ! Tous, nous utilisons cette image dans la vie quotidienne (très peu de gens le perçoivent autrement). Pourtant, elle est fautive, profondément inexacte...

Que cette image ne pouvait être juste est devenu apparent au début du ^{xx}e siècle. Une large part du mérite revient à Albert Einstein qui, avec sa théorie de la relativité, a su exposer les failles de ce concept du temps. D'un coup, il réduisait en miettes les thèses de Newton concernant l'espace et le temps, et rendait

dénuée de sens la division universelle du temps en passé, présent et futur. Il ouvrirait tout simplement la voie au voyage temporel...

La théorie de la relativité a un siècle. Après sa publication en 1905, la théorie de la relativité restreinte est presque immédiatement acceptée par les physiciens. Au fil des décennies, on la teste de manière exhaustive dans de nombreuses expériences. Aujourd'hui, la communauté scientifique est unanime : le temps est relatif et la notion répandue de temps absolu avec un « maintenant » universel est pure fiction ! Mais pour le grand public, la relativité du temps est encore un choc. Beaucoup de gens semblent même ne jamais en avoir entendu parler. Et certains refusent catégoriquement d'y croire, malgré les preuves expérimentales indiscutables.

Dans les chapitres suivants, nous verrons comment la théorie de la relativité implique la possibilité d'une forme limitée – voire sans limites (à n'importe quelle époque, passé ou futur) – de voyage à travers le temps. Cette histoire vous semble difficile à avaler ? Alors souvenez-vous du célèbre dicton de J. B. S. Haldane : « L'univers est non seulement plus étrange que ce que l'on suppose, mais plus étrange encore que ce que l'on ne pourra jamais supposer. »

1

Comment visiter le futur ?

*Le temps n'est pas complètement défini.
Albert Einstein*

À l'évidence, nous sommes tous des voyageurs du temps. Ne faites rien, et vous serez inexorablement transporté vers le futur au rythme inflexible d'une seconde après l'autre. Mais ce voyage là est d'un intérêt limité. Un véritable explorateur du temps doit pouvoir bondir de façon spectaculaire dans le passé, ou atteindre le futur plus rapidement que n'importe qui d'autre.

Est-ce réellement plausible ?

Ça l'est, en effet. Les scientifiques n'ont aucun doute sur le fait qu'il est possible de construire une machine à explorer le temps et visiter ainsi le futur. D'ailleurs, ils connaissent la formule depuis un siècle...

TEMPS ET MOUVEMENT

Nous voici en 1905. Pour la première fois, Albert Einstein démontre la possibilité de voyager dans le temps. Comment ? En démolissant l'image du temps façonnée à l'époque de Newton, et en la remplaçant par son propre concept de temps relatif.

Einstein a vingt-six ans lorsqu'il publie sa théorie de la relativité restreinte. Il n'est pas encore ce sage aux cheveux gris, à la coiffure ébouriffée, fumant sa pipe, stéréotype pour beaucoup du professeur cinglé... Il est un jeune homme soigné, en costume, qui travaille à l'Office des brevets en Suisse. Pendant son temps libre, le jeune Einstein étudie les mouvements de la lumière. À cette occasion, il remarque une incohérence entre le mouvement de la lumière et celui des objets matériels. Employant seulement des outils mathématiques de niveau secondaire, il démontre que si la lumière se comporte de la manière décrite par les physiciens, alors la conception du temps selon Newton doit être incorrecte.

La suite de raisonnements qui conduit du mouvement de la lumière à cette conclusion saisissante a déjà été longuement débattue et ne nécessite pas ici d'autres éclaircissements. Ce qui compte pour nous ? L'affirmation centrale de la théorie de la relativité restreinte :

Le temps est élastique.

Le temps peut être dilaté et contracté.

Comment ? Grâce à un déplacement extrêmement rapide.

Mais qu'entend-on exactement par « temps qui se dilate » ? Laissez-moi vous l'expliquer. Selon la théorie de la relativité

restreinte, la durée exacte du temps écoulé entre deux évènements distincts va dépendre de la façon dont l'observateur se déplace. Par exemple, l'intervalle entre deux carillons successifs de mon horloge devrait être d'une heure lorsque je reste assis au salon, et de moins d'une heure si je passe ce temps à me déplacer !

Pour exprimer la même chose de manière plus concrète, supposez que j'embarque à bord d'un avion à New York, lequel s'envole en direction de Rio. Puis je reviens alors que vous, dans le même temps, n'avez pas bougé de l'aéroport Kennedy. La durée de mon voyage selon moi ne correspond pas à celle du temps écoulé pour vous. En fait, elle est un peu plus courte pour moi.

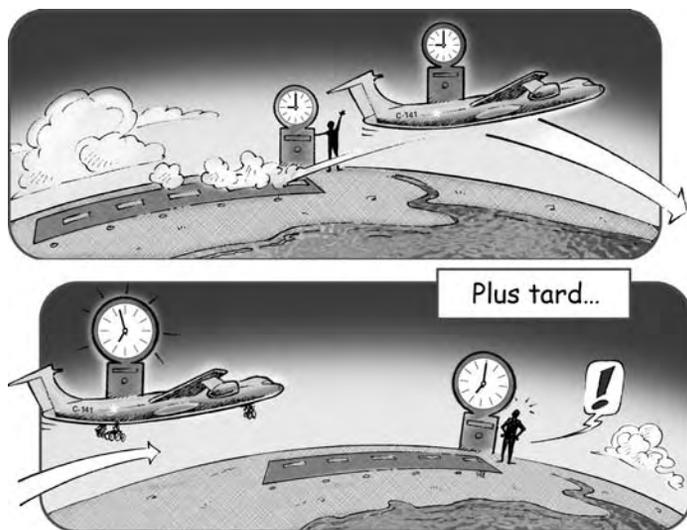
Deux points doivent maintenant être éclaircis. D'abord, je ne parle pas de la durée *apparente* du voyage. Votre expérience de l'ennui éprouvé dans l'aéroport au fil des heures qui semblaient n'en plus finir (alors que moi, j'étais joyeusement en train de me divertir devant des films diffusés à bord de l'avion) n'est pas l'effet évoqué ici. Certes, le temps mental est un sujet fascinant du domaine de la psychologie, mais ma préoccupation reste le temps *physique*, celui que mesurent de simples horloges. Seconde précision, la divergence de temps dans l'exemple présenté est infime – d'à peine quelques cent-millionièmes de seconde – soit bien trop petite pour être perçue par un être humain !

En revanche, elle peut l'être par une horloge moderne, expérience d'ailleurs réalisée en 1971 par les physiciens Joe Hafele et Richard Keating. À l'époque, ils placent des horloges atomiques ultra-précises à bord d'un avion, effectuent un tour du monde puis comparent leurs lectures avec des horloges identiques restées au sol. Résultat sans ambiguïté aucune : le temps s'écoule moins vite à bord de l'avion qu'au laboratoire ! En fin d'expérience,

l'heure indiquée par les horloges embarquées dans l'avion compte cinquante-neuf nanosecondes de moins que les horloges du laboratoire, soit exactement la durée annoncée par la théorie d'Einstein.

Ainsi, votre temps et le mien étant désynchronisés si nous nous déplaçons différemment, le temps ne peut manifestement pas être universel ou absolu comme le supposait Newton... Parler *du* temps est donc dénué de sens. D'où cette question que vous poserait certainement le physicien : le temps ? Le temps pour qui ?

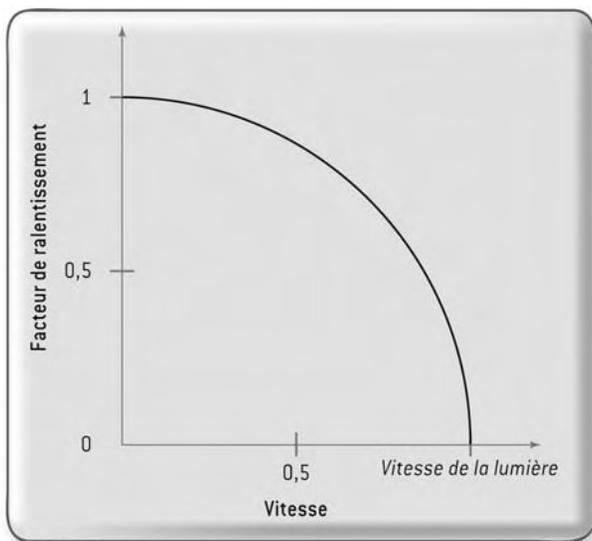
Aussi importante historiquement que soit l'expérience de Hafele-Keating, elle est loin de contenir les ingrédients d'une palpitante aventure de science-fiction. Une distorsion temporelle de cinquante-neuf nanosecondes, pas de quoi fouetter un chat ! Alors que faire pour obtenir un effet à couper le souffle ?



1 | Le temps s'écoule moins vite à bord de l'avion en mouvement qu'au laboratoire.

Se déplacer beaucoup plus vite... Pour ce faire, le point de référence est la vitesse de la lumière, vertigineuse à 300 000 kilomètres par seconde. Plus vous vous en approchez, plus la distorsion temporelle sera importante.

Explication. Les physiciens appellent ce ralentissement du temps par le mouvement « effet de dilatation du temps ». Prenez une vitesse, divisez-la par celle de la lumière, élevez le résultat au carré, ôtez-le de 1 et prenez la racine carrée de ce nombre. Qu'est-ce donc ? Le facteur de dilatation du temps d'Einstein ! Le graphique (figure 2) présente le « facteur de ralentissement du temps » en fonction de la vitesse. Au départ, la courbe est quasiment plate. Puis, le facteur de dilatation diminue au fur et à mesure que l'on s'approche de la vitesse de la lumière. Ainsi, pour une vitesse équivalente à la moitié de cette valeur, le temps est



2 | Facteur de ralentissement en fonction de la vitesse.

ralenti d'environ 13 % ; à 99 % de sa valeur, de sept fois plus encore (1 minute est réduite à environ 8,5 secondes).

Techniquement, la distorsion temporelle devient infinie lorsque la vitesse de la lumière est atteinte. C'est là que les ennuis commencent... Car, ce graphique nous signale qu'un corps matériel normal ne peut atteindre la vitesse de la lumière. Il existe un « mur de la lumière » qu'il est impossible de dépasser. La règle du « pas-plus-vite-que-la-lumière » est un résultat clé de la théorie de la relativité :

Rien ne peut dépasser le mur de la lumière.

Cette règle ne comprend pas seulement les corps matériels mais aussi les ondes, les perturbations de champs – les influences physiques de toutes sortes. Voilà qui n'aide pas beaucoup la science-fiction car aussi vite qu'elle aille, la lumière a encore besoin d'énormément de temps pour parcourir les distances interstellaires. Un simple exemple : l'étoile la plus proche est à plus de quatre années-lumière de chez nous, ce qui signifie qu'il faut plus de quatre ans à la lumière partie de la Terre pour l'atteindre. Quant à la Voie lactée, elle s'étend sur environ 100 000 années-lumière, il serait bien lent de gouverner un tel empire galactique !

Heureusement, des compensations existent. Comme le temps est dilaté par la vitesse, les voyages interstellaires paraîtraient plus rapides aux astronautes qu'aux techniciens restés à Terre au centre de contrôle. Pour un vaisseau spatial se déplaçant à une vitesse atteignant 99 % de la vitesse de la lumière, un voyage à travers la galaxie serait effectué en seulement 14 000 ans. À hauteur de 99,99 %, le gain serait encore plus spectaculaire :

l'expédition ne durerait plus que 1 400 ans. Et à hauteur de 99,999999 %, elle serait achevée en une durée qui ne dépasserait pas l'espérance de vie humaine moyenne !

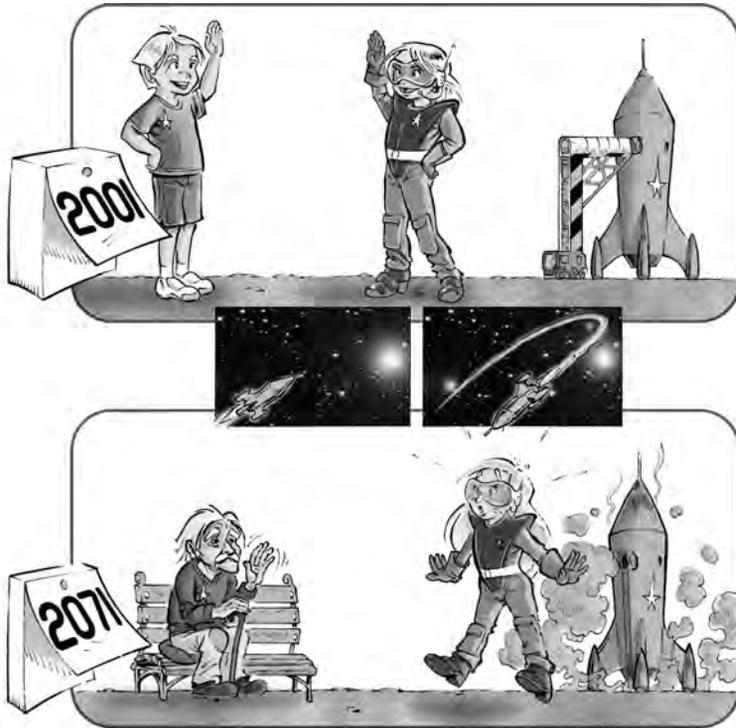
De pareilles vitesses sont très éloignées des technologies actuelles. Notre navette spatiale la plus performante représente un dérisoire 0,01 % de la vitesse de la lumière... Cependant, il existe des objets se déplaçant à une vitesse très proche de celle de la lumière. Il s'agit des particules subatomiques, comme les rayons cosmiques et les fragments atomiques émis lors de désintégrations radioactives, ou intentionnellement accélérés dans les accélérateurs de particules géants. Il est possible d'observer de très importantes dilatations de temps en utilisant ces particules comme de simples horloges. L'accélérateur de particules, connu sous le nom de LEP (pour *Large Electron Positron collider*), du laboratoire de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (plus connue sous l'acronyme CERN), installé près de Genève, pourrait propulser des électrons à une vitesse équivalente à 99,99999999 % de la vitesse de la lumière. À ce niveau, on atteint volontiers des facteurs de distorsion temporelle approchant un million. Malgré cela, les chiffres restent dérisoires face aux facteurs de distorsion temporelle de l'ordre de plusieurs milliards ressentis par certains rayons cosmiques...

Dans une série d'expériences minutieuses réalisées au CERN en 1966, les chercheurs faisaient circuler des particules connues sous le nom de *muons* à l'intérieur d'un petit accélérateur. Objectif: tester l'équation de la dilatation du temps d'Einstein avec une grande précision. Les muons sont instables et se désintègrent suivant une demi-vie connue. Ainsi, un muon « installé » sur votre bureau se désintégrerait en moyenne en deux microsecondes. Mais lorsque les muons se déplaçaient à l'intérieur de

l'accélérateur du CERN à une vitesse équivalente à 99,7 % de celle de la lumière, leur durée de vie moyenne était augmentée d'un facteur douze.

On évoque souvent l'effet du mouvement sur le temps à l'aide de la parabole des jumeaux. Voici comment on peut la raconter. Sally et Sam décident de tester la théorie d'Einstein. Sally monte à bord d'un vaisseau spatial en 2001, et file à une vitesse équivalente à 99 % de la vitesse de la lumière vers une étoile voisine située à dix années-lumière. Sam, lui, reste à la maison. Dès qu'elle atteint sa destination, Sally fait immédiatement demi-tour. La voici qui fait route vers chez elle (toujours à la même vitesse)... Pour Sam, la durée du voyage de sa sœur s'est étalée sur vingt années terrestres. Pour Sally, le temps s'est écoulé différemment et le voyage a duré moins de trois ans. Pourtant, elle arrive sur Terre en l'an 2021 et Sam a dix-sept ans de plus qu'elle. Conclusion, Sally et Sam ne sont plus des jumeaux du même âge ! En effet, Sally a été transportée dix-sept ans en avant dans le futur de Sam. Vous aussi, à une vitesse suffisamment élevée, pourriez « sauter » à n'importe quelle date dans le futur... En voyageant à une vitesse équivalente à 99,99999 % de la vitesse de la lumière, l'an 3000 pourrait être atteint en moins de six mois.

Attention cependant, un voyage dans le temps s'effectue de manière opposée à un voyage dans l'espace. La plus petite distance entre deux points est une ligne droite. Ainsi, dans la vie courante, vous allez plus rapidement d'un point A à un point B en suivant une trajectoire directe. S'agissant du voyage dans le temps et des jumeaux, Sam qui est resté chez lui est le plus âgé. Il a pris autant d'années supplémentaires que d'années qui se sont écoulées pour atteindre 2021... En se déplaçant à une telle allure, Sally a considérablement réduit la différence de temps



3 | La parabole des jumeaux.

entre les deux évènements « Année 2001 sur Terre » et « Année 2021 sur Terre ». En fait, plus elle intensifie sa vitesse, plus l'écart de temps pour elle entre ces deux évènements diminue.

Beaucoup de gens voient en cette histoire des jumeaux un paradoxe, car, du point de vue de Sally, elle est au repos dans le vaisseau spatial tandis que la Terre s'éloigne à toute vitesse. Pourtant, il n'y a pas de paradoxe, la situation de Sally et celle de Sam n'étant pas symétriques. Sally s'éloigne de sa planète en

accélérant grâce aux moteurs de sa navette, manœuvre autour de l'étoile puis décélère au moment d'atterrir, de retour chez elle. Ces modifications de mouvements font de Sally celle qui vieillit le moins vite des deux.

Notez que Sally ne peut pas « retourner » de cette manière à l'année 2007 sur Terre (le voyage étant de six ans après son départ) pour ré-égaliser son âge avec celui de Sam. En effet, si elle suit une trajectoire inverse, elle réussira seulement à bondir de dix-sept ans de plus dans le futur de son frère. Le mouvement à très grande vitesse est un voyage à sens unique vers l'avenir !

COMMENT UTILISER LA GRAVITATION POUR VOYAGER VERS LE FUTUR ?

La vitesse est une méthode permettant de déformer le temps, la gravitation en est une autre... Dès 1908, Einstein commence à élargir sa théorie de la relativité restreinte pour y inclure les effets de la gravitation. Usant d'un autre raisonnement ingénieux concernant la lumière, il arrive à cette remarquable conclusion :

La gravitation ralentit le temps.

Raisonnement qu'il ne parvient à expliquer qu'en 1915 en présentant sa fameuse théorie de la relativité générale... Ce travail reprenait la théorie de la relativité restreinte publiée en 1905 et y incluait les effets des champs gravitationnels sur le temps, ainsi que sur l'espace.

Appliquer des nombres dans l'équation d'Einstein montre que la gravité de la Terre provoque la perte, sur les horloges,

d'une microseconde tous les trois cents ans, observation qui conduit à cette curieuse prédiction :

Le temps s'écoule plus vite dans l'espace.

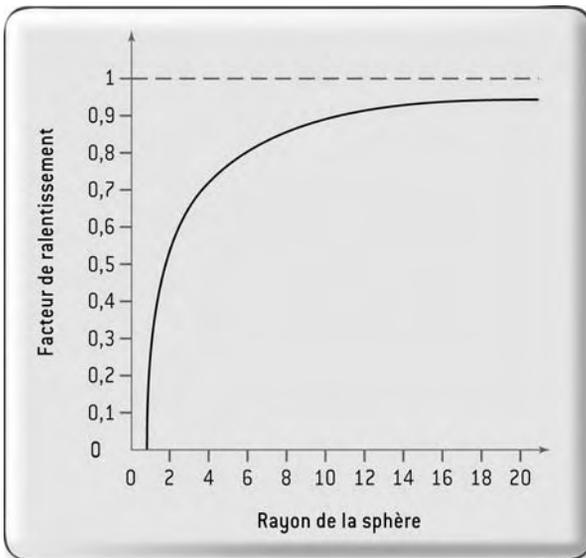
Pas suffisamment pourtant pour que les astronautes le réalisent (ils devraient gagner deux millisecondes en passant six mois à bord de la Station spatiale internationale) ! En revanche, les physiciens peuvent facilement mesurer cet effet à l'aide d'horloges précises. En 1976, Robert Vessot et Martin Levine envoient un maser à hydrogène – une horloge atomique – dans l'espace depuis l'ouest de la Virginie, puis le surveillent avec attention depuis la Terre. En fin d'expérience, avant de s'écraser dans l'océan Atlantique deux heures plus tard, l'horloge embarquée à bord de la navette a gagné de fait environ un dixième de microseconde.

De même, il existe un tel écart (infime) entre le haut et le bas d'un immeuble. En 1959, des chercheurs de l'université de Harvard réalisent une expérience sur une tour de 22,5 mètres de hauteur afin de mesurer le facteur de distorsion temporelle. Résultat, grâce à un procédé nucléaire extrêmement précis, ils ont enregistré un effet de ralentissement de 0,000000000000257 %. Aussi ridicule qu'elle paraisse, cette valeur mesurée confirme la prédiction d'Einstein. D'ailleurs, personne n'en a vraiment été surpris à l'époque, les physiciens ayant depuis longtemps déjà accepté l'effet de la gravitation sur le temps...

Imaginons que vous puissiez d'un simple coup de baguette magique réduire de moitié le diamètre de la Terre – tout en conservant l'intégralité de sa masse –, la gravité en sa surface serait alors deux fois plus forte et de même pour la distorsion temporelle. Continuez à la comprimer et l'effet augmente encore.

Lorsque le rayon atteint une valeur critique de 0,9 cm, le temps « s'immobilise ». Plus rien ne peut s'échapper ! Le graphique (figure 4) présente ce « facteur de ralentissement » pour une horloge située à la surface d'une sphère en contraction. Quand celle-ci atteint la taille d'un petit pois, la distorsion temporelle tend vers l'infini.

Bien sûr, écraser toute cette matière pour en faire un objet d'un centimètre cube est une idée particulièrement fantaisiste. Mais de prodigieuses compressions surviennent réellement en astrophysique ! Par exemple, lorsque les étoiles ont brûlé tout leur stock de combustible, elles s'effondrent de manière spectaculaire sous leur propre poids, finissant en une minuscule fraction de leur taille d'origine. Certaines grosses étoiles implosent soudainement.



4 | Facteur de ralentissement pour une horloge située à la surface d'une sphère en contraction.

Elles se transforment en une sphère en rotation pas plus grosse que Manhattan, et de masse supérieure à celle du Soleil (2×10^{27} tonnes). La gravité de ces étoiles effondrées est si grande que même leurs atomes sont écrasés pour former des neutrons, d'où leur appellation « étoiles à neutrons ». On trouve un tel objet dans la constellation du Taureau. Connue sous le nom de Nébuleuse du Crabe, elle se présente sous la forme d'un nuage irrégulier de gaz en expansion qui contient les restes effondrés d'une étoile massive. L'explosion de cette étoile a pu être observée en 1054, et décrite par des chroniqueurs chinois.

Les astronomes ont découvert de nombreux autres objets comme celui-ci et ont déterminé que la gravité à leur surface est suffisamment importante pour provoquer une distorsion temporelle considérable. Par conséquent, une horloge sur une étoile à neutrons typique tournerait environ 30 % moins vite qu'une autre, installée sur Terre. Prenez une résidence près d'une étoile à neutrons (certes, ce ne serait pas très pratique...) et vous disposez d'une véritable machine à voyager dans le temps pour aller dans le futur. Sept ans passés là-bas correspondraient ainsi à dix passés sur Terre !

Si vous pouviez observer la Terre depuis la surface d'une étoile à neutrons, vous pourriez voir les événements terrestres se dérouler en mode Avance rapide comme sur une vidéo. Les événements se produisant dans votre environnement immédiat sembleraient, eux, avoir lieu à vitesse normale. Ce ne serait même pas comme si vous viviez dans un monde en vitesse accélérée ou que le temps mental passait à toute allure de manière déconcertante. Fabuleux, non ?

Est-ce que tout cela est vrai ? Oui, ça l'est. Il existe deux étoiles à neutrons dans la constellation de l'Aigle qui « batifolent » l'une

avec l'autre, émettant régulièrement des signaux radio, lesquels ont permis aux astronomes de confirmer avec grande précision les effets de distorsion temporelle annoncés par la théorie de la relativité générale d'Einstein.

EST-CE VRAIMENT LE TEMPS QUI RALENTIT ?

Certaines personnes répliquent que la théorie de la relativité décrit seulement comment les *horloges* sont affectées par le mouvement et la gravitation, et non le temps lui-même... Il s'agit d'un malentendu. En effet, les horloges mesurent le temps qui s'écoule. Si toutes les horloges – y compris celle du cerveau humain, qui gouverne notre perception personnelle du temps – sont ralenties de manière identique, alors il est correct de dire que le temps lui-même est ralenti, puisqu'il n'y a pas de durées de temps autres que celles pouvant être mesurées par n'importe quelle horloge. De la même façon, si toutes les distances avaient été réduites en longueur par le même facteur, il serait correct de dire que l'espace a rétréci.

Pour éclaircir ce point, supposons que je possède une vieille pendule fragile héritée de mon grand-père et que je l'emporte à bord d'un avion à réaction afin de tester l'effet de dilatation du temps. Si elle vient à tomber en morceaux lorsque l'avion atterrit sur la piste, il est faux de conclure que le temps cesse à bord de l'avion sous prétexte que l'horloge s'est arrêtée de fonctionner... Pour donner du sens à la dilatation du temps, les effets de l'accélération sur le mécanisme de l'horloge doivent être exclus avant de conclure quoi que ce soit sur le temps lui-même. La dilatation du temps est le phénomène purement temporel qui demeure. Notez que durant un mouvement homogène, tel le vol uniforme d'un

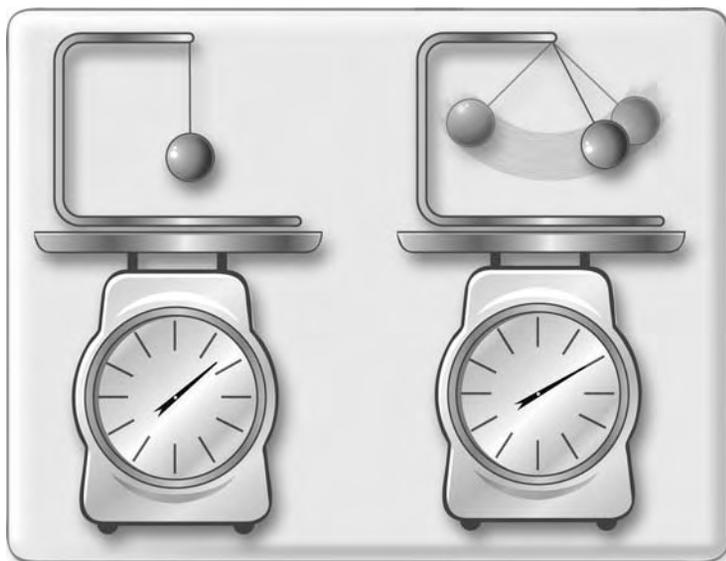
avion, il n'y a pas d'effet mécanique sur les horloges (il y a bien longtemps, Galilée nous a appris que le mouvement uniforme est seulement relatif). Une vitesse constante ne provoque pas l'application de forces pouvant affecter une horloge. Sinon, nous devrions aussi nous inquiéter d'éventuelles conséquences sur les horloges de la vitesse de la Terre dans l'espace !

E = MC² : LA CÉLÈBRE ÉQUATION D'EINSTEIN

Chacun d'entre nous, qu'il ait ou non une culture scientifique de base, connaît la célèbre équation d'Einstein $E = mc^2$. Celle-ci joue un rôle essentiel dans notre histoire de voyage dans le temps... Que cachent donc ces symboles ? E pour énergie ; m pour la masse et c, la célérité de la lumière. Quant à la théorie, elle nous explique que masse et énergie sont liées, que l'énergie a une masse et que la masse est une forme d'énergie. Dans la figure 5, le pendule en mouvement est très légèrement plus lourd que le même pendule statique, ceci car l'énergie cinétique du pendule a une masse. Le facteur de conversion c^2 est un très grand nombre car la vitesse de la lumière est colossale. Cela signifie qu'un peu de masse représente un énorme concentré d'énergie. Exemple : un gramme de matière converti en électricité pourrait fournir de l'énergie à une ville entière pendant plusieurs jours ! Les réactions nucléaires utilisées dans les centrales électriques convertissent environ 1 % de la masse de combustibles en énergie (production beaucoup plus importante que dans les réactions chimiques). Inversement, les quantités d'énergie utilisées dans la vie courante n'ont pas une masse énorme. Ainsi, l'énergie calorifique dont a besoin une bouilloire ne pèse guère plus de cinquante picogrammes.

L'énergie intervient dans l'histoire de la machine à remonter le temps par le phénomène de gravitation. La masse est source de gravité. Puisque l'énergie a une masse, elle doit également l'être... La chaleur accumulée à l'intérieur de la Terre contribue, par exemple, pour quelques nanogrammes au poids de notre corps.

Pour en revenir à Einstein, il a tiré son équation de la théorie de la relativité restreinte. Une façon d'entrevoir le lien décrit est de réfléchir au fait que les corps matériels ne peuvent aller plus vite que la lumière. Donc qu'arrive-t-il si vous essayez de faire accélérer une particule de matière à des vitesses s'approchant du mur de la lumière? Ce sont précisément les expériences sur



5 | Le pendule en mouvement est très légèrement plus lourd qu'un pendule identique statique.

lesquelles travaillent les physiciens avec les particules subatomiques dans leurs accélérateurs géants. Premier constat : plus la vitesse de la particule s'approche de celle de la lumière, plus la particule s'alourdit (autrement dit, plus elle prend de masse) ! Ainsi, un électron propulsé à l'intérieur de l'accélérateur LEP pèse environ 200 000 fois plus lourd qu'un électron au repos. Il devient de plus en plus difficile d'accélérer la particule. En résumé, plus l'énergie alourdit cette particule, moins la vitesse de celle-ci augmente. La vitesse de la lumière correspond à l'extrême limite : si la particule pouvait l'atteindre, cela impliquerait qu'elle aurait une masse infinie. Et pour la faire aller encore plus vite, il faudrait une force infinie, chose impossible...

LE FUTUR EST AILLEURS

Bien qu'il écrive dix ans avant la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, H. G. Wells réalise que le temps peut être conçu comme une quatrième dimension. Il suppose que s'il est possible de se déplacer dans les trois dimensions de l'espace, alors il doit l'être aussi dans la dimension du temps. Mais cette idée captivante présume tacitement que le passé et le futur sont « ailleurs », qu'en l'occurrence, le présent ne représente pas à lui seul le réel. Les physiciens pensent en effet que tous les temps co-existent, composant un « paysage du temps » étendu. Aussi, si les concepts de passé, présent et futur sont des systèmes linguistiques commodes dans la société humaine, ils n'ont finalement pas de véritables significations physiques. Einstein lui-même l'expliquait à un ami dans un courrier. « La distinction entre passé, présent et futur » écrivait-il « n'est qu'une illusion, même si elle est tenace. »

L'idée perturbe souvent les non-physiciens. Comment le passé et le futur peuvent-ils exister en parallèle avec le présent ? Einstein avançait les arguments suivants afin d'expliquer pourquoi il est impossible de « disséquer » correctement le temps (en passé, présent et futur) de façon à ce qu'il soit le même pour tous les observateurs. D'abord, commencez par vous poser cette question : comment savons-nous que « maintenant » ici correspond à « maintenant » ailleurs ? Pensez-y. Supposez qu'il soit 18 heures là où vous êtes. Quels événements se produisent de l'autre côté de la planète à cet instant précis ? Selon Einstein, il n'y a pas de réponse exacte à une question si simple.

Pourquoi ? Ne pouvons-nous pas simplement téléphoner à quelqu'un et faire une comparaison détaillée ? Le problème en fait vient des signaux téléphoniques. Il leur faut un certain temps pour voyager, même à la vitesse de la lumière. Les messages vocaux traversent le globe via les fibres optiques en sept centièmes de seconde environ. Bien sûr, le délai n'est pas vraiment perceptible à l'oreille humaine. Mais les nouvelles venues de l'autre côté du monde arrivent effectivement avec un peu de retard. Pas tant que cela, certes, mais tout de même. Précisons un peu le principe : si votre ami était sur Mars, vous devriez patienter vingt minutes pour savoir ce qu'il se passe chez lui ! Puisque aucun signal ne peut se propager plus rapidement que la lumière – principe fondamental de physique – un retard est inévitable.

En lui-même, le délai n'est pas un problème pour essayer d'établir une simultanéité. Vous pourriez simplement le compenser en soustrayant l'intervalle de temps nécessaire à l'arrivée du signal. La vraie difficulté consiste dans le fait que les observateurs qui se déplacent différemment ne peuvent s'accorder sur la valeur de ce facteur compensatoire, leurs horloges

tournant différemment en raison de l'effet de la dilatation du temps... Forcément ensuite, les avis différeront en fonction de la personne consultée et de l'étendue du retard pris pendant que les signaux lumineux (ou radio) circulent de A vers B! Ainsi, un astronaute passant à allure folle au-dessus de la Terre (à une vitesse équivalente à la moitié de celle de la lumière) aura sans doute beaucoup de mal à tomber d'accord avec un observateur terrestre sur le temps de retard précis pris par un signal faisant le tour du monde...

Résumons : avec de telles disparités, il n'existe pas d'évènement se produisant de l'autre côté du monde, sur Mars, ou généralement en n'importe quel point de l'espace, qui soit exactement simultané à votre « maintenant » à vous. Un ensemble d'évènements se déroulera en des endroits distants. Juger qu'un évènement particulier se produit au même moment « qu'à 18 heures chez vous » dépend de la façon spécifique dont se déplace l'observateur. L'ambiguïté n'est pas si grande lorsque la situation est limitée à la Terre (une simple fraction de seconde...), mais la variété des « maintenant » augmente avec la distance. Pour Mars, le retard est de quelques minutes. Pour une étoile se trouvant de l'autre côté de la galaxie, les évènements qui se déroulent au même moment qu'un évènement sur Terre aujourd'hui peuvent en réalité être situés quelque part sur un intervalle de temps de 100 000 ans ! Conclusion, il ne peut exister un unique moment présent qui soit le même pour tout le monde et partout. Bref,

Il n'existe pas de « maintenant » universel.

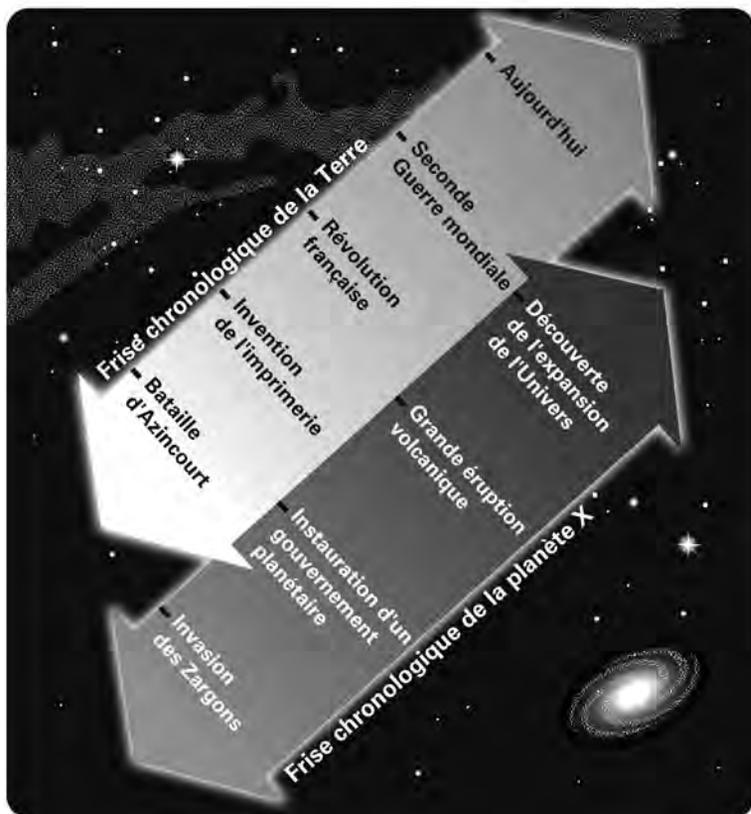
Nous devons accepter le fait que le temps à un endroit éloigné puisse se prolonger quelque peu entre ce que nous percevons

comme étant du passé ou du futur. Par symétrie, les observateurs distants considéreront le temps sur Terre comme s'étendant dans leur passé ou leur futur. Il n'y a pas d'autres façons de donner un sens à tout cela. Manifestement donc, il est faux de penser que seul le présent est réel, à travers le cosmos. Des événements que vous estimez appartenir au passé seront perçus par d'autres comme appartenant à leur futur ou à leur présent, et vice versa.

Prenons un exemple concret. La Terre présente une histoire définie, idem pour une hypothétique planète X située à 5 000 années-lumière d'ici. Et du coup, les tentatives de comparaison des dates d'événements spécifiques survenus sur les deux planètes sont absurdes car l'alignement des frises chronologiques respectives est ambigu sur une durée comptée en milliers d'années !

Cela *n'implique pas* pour autant que l'ordre de cause et d'effet puisse être inversé simplement en voyageant rapidement... Laissez-moi vous expliquer pourquoi. Les événements ont un ordre chronologique ambigu seulement si la lumière ne dispose pas d'assez de temps pour passer de l'un à l'autre. Imaginons que je tire un coup de feu sur Terre et qu'un astronaute fasse de même sur Mars une seconde plus tard (de mon point de vue), un observateur installé dans une fusée lancée à toute allure pourrait très bien penser que le pistolet sur Mars a été déchargé en premier (de son point de vue). Si en revanche le pistolet sur Mars a été utilisé une semaine après le mien, tout le monde sera d'accord pour dire qui a tiré le premier (une semaine étant une durée suffisamment longue pour que la lumière puisse parcourir la distance Terre-Mars). Si aucune influence physique ne peut dépasser la vitesse de la lumière, les événements dont l'ordre apparaît de manière ambiguë dans le temps ne peuvent jamais s'affecter mutuelle-

ment. Donc le principe de causalité n'est pas menacé. Remarquez cependant que si la règle du « pas-plus-vite-que-la-lumière » était fautive, celle de causalité aurait de sacrés ennuis ! Quant au passé et au futur, ils finiraient par se mélanger. Comme nous allons le voir, cette petite précision prend tout son sens et est d'une importance considérable pour la conception d'une machine à explorer le temps.



6 | Tenter de comparer les dates d'événements spécifiques survenus sur les deux planètes est vain.

Il n'y a jamais d'ambiguïté concernant l'ordre dans le temps d'une séquence d'évènements qui se sont produits en un lieu donné. Personne n'oserait prétendre que la bataille de Hastings s'est déroulée après celle de Waterloo ! Le problème surgit seulement lorsque les évènements « d'ici » et « maintenant » sont comparés avec d'autres ayant lieu « là-bas » et « maintenant » (« là-bas » étant très très loin « d'ici »). Les divergences sont trop petites pour être perçues sur Terre : pas seulement du fait que la lumière met très peu de temps pour faire le tour du monde, mais aussi parce que l'être humain ne parvient à se déplacer qu'à une infime fraction de la vitesse de la lumière... Mais cela est secondaire car le point crucial ici est qu'il ne peut exister de véritable signification assignée à l'expression « au même moment » en deux endroits différents.

Ainsi, le futur est ailleurs. Il peut être visité. En définitive, tout ce dont nous avons besoin pour disposer d'une machine à explorer le temps efficace, c'est d'un vaisseau capable de se déplacer à des vitesses proches de celle de la lumière ou de résister aux conditions létales qui entourent les étoiles à neutrons. Une vitesse très élevée n'est en principe pas un problème, seulement une difficulté pratique qui pourrait être surmontée un jour ou l'autre... Principal inconvénient alors ? Le coût en énergie du voyage. Pour accélérer une charge utile de dix tonnes et la faire grimper à une vitesse équivalente à 99,9 % de la vitesse de la lumière, une consommation d'énergie de dix milliards de milliards de joules est indispensable (l'équivalent de la production d'énergie de l'humanité entière sur plusieurs mois) ! De plus, l'énergie nécessaire augmente en proportion directe avec la distorsion temporelle souhaitée : diminuer de moitié la vitesse d'une horloge demande deux fois plus d'énergie. Avec ces coûts énormes et

l'état des technologies spatiales actuelles, nous ne sommes pas prêt de goûter aux « joies » du saut dans le futur ! Par contre, si l'on venait à découvrir des sources d'énergie naturelles que l'on pourrait puiser directement dans l'espace, une telle expédition deviendrait enfin possible. Alors pourrions-nous peut-être maîtriser l'avenir...

Quid du retour de ce futur ?

Le voyage à très grande vitesse et la dilatation gravitationnelle du temps peuvent être utilisés uniquement pour aller en avant dans le temps. Mais aussi sûr que le futur est ailleurs, le passé l'est aussi. Nous pouvons lui rendre visite. Toute l'astuce est de savoir comment.

2

Comment visiter le passé ?

*Il y avait une jeune fille prénommée Bright
dont la vitesse dépassait celle de la lumière.
Un jour, elle s'engagea sur une route relative
et arriva la nuit précédente.*

Punch, 19 décembre 1923

(limerick attribué à A. H. Reginald Buller)

La première allusion à une possible utilisation de certains champs gravitationnels pour voyager dans le passé et le futur remonte à 1937. Elle est évoquée dans un article peu connu de W. J. van Stockum publié dans une revue scientifique écossaise. Van Stockum utilisa la théorie de la relativité générale d'Einstein pour prédire ce qui arriverait si un observateur se plaçait en orbite autour d'un cylindre en rotation. Il découvrit ainsi que si le cylindre tournait suffisamment vite, l'observateur pourrait retourner à son point de départ *avant* de l'avoir quitté. En d'autres termes, une boucle fermée dans l'espace pourrait également

devenir une boucle dans le temps ! Idée qui à l'époque ne fit pas sensation car pour simplifier l'aspect mathématique, van Stockum supposa de manière peu probable que le cylindre était infiniment long. Malgré tout, le résultat servit à montrer que la théorie de la relativité générale n'interdisait pas explicitement de voyager dans le passé. Un demi-siècle devait encore s'écouler pour qu'enfin les physiciens découvrent une façon plus réaliste de concevoir une machine à explorer le temps.

COMMENT VOYAGER PLUS VITE QUE LA LUMIÈRE ?

Une décennie après la publication de l'article de van Stockum, l'éminent logicien autrichien Kurt Gödel établissait une autre solution aux équations de la relativité générale d'Einstein qui contenait des boucles temporelles. Gödel travaillait alors à l'Institut pour l'étude avancée à Princeton aux côtés d'Einstein. Sa découverte ? Si l'univers entier était en rotation, il devait être possible de trouver des orbites dans l'espace qui retournent... vers le passé ! En fait, Gödel montra que dans un tel univers, on pouvait quitter la Terre et voyager vers *n'importe où et n'importe quand*.

Seulement, son modèle mathématique était perçu comme une simple curiosité, non comme une proposition sérieuse. Dans les années 1940, les astronomes avaient encore de bonnes raisons de douter que l'univers soit en rotation (bien que des galaxies individuelles le soient, elles). Aujourd'hui, les mesures du rayonnement thermique produit par le Big Bang peuvent être utilisées pour déterminer avec précision une éventuelle rotation cosmique, mais aucune n'est observée. Malgré sa nature artificielle manifeste, le modèle de l'univers de Gödel a sérieusement

perturbé Einstein. Ce dernier finit par admettre qu'il s'était lui aussi interrogé au sujet du voyage dans le passé depuis le moment où il avait formulé sa théorie de la relativité générale.

Quel est donc ce mystère qui autorise la rotation à ouvrir une porte sur le passé ? Une indication se trouve dans le célèbre limerick en début de chapitre. Comme je l'expliquais dans le chapitre 1 avec la règle « pas-plus-vite-que-la-lumière », l'ordre des événements qui peuvent être reliés par des signaux de lumière n'est jamais mis en doute. Mais s'il était possible de voyager plus vite que la lumière, le chaos causal règnerait... Il serait possible d'inverser causes et effets, en d'autres termes, de changer « l'avant » et « l'après » de paires d'événements séparés dans l'espace. Il n'y a qu'un pas entre un tel renversement de l'ordre temporel et visiter effectivement le passé. En clair, « plus vite que la lumière » peut signifier « retour dans le passé ».

Cependant, il existe une subtilité. La rotation ne permet pas à un astronaute (ni même à une particule de matière) de franchir le mur de la lumière, mais affecte le mouvement de la lumière. Selon la théorie de la relativité générale, si un corps massif (un cylindre, l'univers, etc.) est en rotation, il agira comme un vortex dans l'espace et entraînera n'importe quel rayon de lumière passant autour de lui. D'ordinaire, ce phénomène d'entraînement est très faible, mais si le corps est suffisamment lourd et tourne assez vite, la lumière peut être prise dans le champ gravitationnel tourbillonnant et se mettre à tourner en boucle. Si un astronaute intrépide s'aventure dans ce tourbillon gravitationnel, lui aussi sera pris puis entraîné. À tous moments, l'astronaute voyagera autour du corps en rotation *plus lentement* que la lumière à proximité. Mais puisque la lumière elle-même tourbillonne, l'astronaute se retrouvera en

réalité dans la situation de mademoiselle Bright par rapport à un observateur distant. Localement, le mur de la lumière n'est pas franchi, mais globalement – si l'on considère le système dans son entier – l'astronaute semble dépasser la vitesse de la lumière. Dans les années 1970, le physicien Franck Tipler montra qu'un cylindre superdense en rotation sur son axe, à une vitesse équivalente à la moitié de la vitesse de la lumière, pourrait servir de machine à explorer le temps. Son scénario cependant n'était pas physiquement réaliste.

Si les idées récentes concernant les machines à explorer le temps n'exigent pas de rotation, elles aussi impliquent une façon de distancer efficacement la lumière. Proposition la plus populaire ? Le « trou de ver ». Comme nous le verrons, il s'agit d'un tunnel dans la structure de l'espace, sorte de raccourci entre deux endroits séparés d'une longue distance. En voyageant à l'intérieur d'un trou de ver, un astronaute serait capable d'arriver à un point B depuis un point A avant la lumière (celle-ci ayant voyagé dans l'espace normal) !

Alors, qu'est-ce exactement qu'un trou de ver ? Pour introduire ce concept, il faut d'abord comprendre ce qu'est cet objet plus célèbre, le trou noir.

COMMENT FABRIQUER UN TROU NOIR ?

Les trous noirs sont assez médiatisés. Aujourd'hui, la plupart des gens connaissent l'idée de base : les trous noirs sont des corps denses et noirs de l'espace qui aspirent tout ce qui se trouve autour d'eux. Les plus petits – de quelques kilomètres de large – se forment lorsque de grosses étoiles s'éteignent puis s'effondrent sous leur propre poids. Certaines deviennent des

étoiles à neutrons, d'autres, des trous noirs stellaires. Notre soleil, lui, étant de masse plutôt modeste, échappera sans doute à ce destin et finira probablement ses jours sous la forme d'une naine blanche.

Certains astronomes pensent que la galaxie pourrait être parsemée de myriades de trous noirs stellaires, vestiges de la mort d'étoiles géantes nées il y a des milliards d'années avant le système solaire.

Des trous noirs beaucoup plus gros – les trous noirs supermassifs – sont tapis aux centres des galaxies. Ainsi, la nôtre – la Voie lactée – semble en héberger un de masse équivalente à un million de soleils environ ! D'autres galaxies sont connues pour accueillir des trous noirs centraux mille fois plus gros encore... Parfois, la matière pénétrant en spirale dans ces objets supermassifs libère de colossales quantités d'énergie qui créent de violentes perturbations. Un intense rayonnement est émis, et des jets de matière jaillissent à une vitesse proche de la vitesse de la lumière.

Mais au fait, pourquoi ce nom « trous noirs » ? Il a été inventé par le physicien John Wheeler à la fin des années 1960. Il le choisit avec soin afin de résumer les deux propriétés qui caractérisent ces objets : la noirceur et le vide. Une étoile à neutrons contient ce qui est sans doute la matière la plus compactée dans l'univers. Malgré cela, cette dernière n'est pas non plus totalement incompressible. Et si l'on pouvait la comprimer encore, la force de gravité deviendrait écrasante et l'étoile s'effondrerait complètement... Ce phénomène se produit à l'intérieur de grosses étoiles qui, ayant consommé la totalité de leur combustible, ne peuvent plus supporter leur pression interne. Le cœur implose brusquement en une fraction de seconde. Il laisse derrière lui une région d'espace vide, d'où ce terme « trou » (en pratique, la région

environnante n'est pas totalement vide en raison de la présence de restes déchiquetés de l'étoile, mais ces éléments sont ensuite soufflés ou aspirés).

Le mystère entoure toujours le sort de la matière implosée. Où va-t-elle ? Pour le moment, imaginez l'étoile comme une boule parfaitement sphérique. Elle se contracte progressivement, en conservant toute sa matière. Comme je l'expliquais dans le chapitre 1, plus cette sphère rétrécit, plus le champ gravitationnel à sa surface augmente. À un moment donné, il est si puissant qu'aucune matière connue ne pourrait y résister. La sphère finit par s'effondrer. S'agissant d'une sphère parfaite – rien ne trouble sa symétrie –, la boule reste une sphère au moment de son implosion. Autrement dit, toute la matière qu'elle contient se déplace en direction du centre géométrique jusqu'au dernier instant. Et plus la taille de la sphère diminue, plus l'influence du champ gravitationnel est intense, et plus vite, la sphère rétrécit encore.

Bouquet final ? En de pareilles conditions, le phénomène se termine ainsi : la totalité du contenu de la boule se concentre en un seul point, au centre. Bien sûr, ce point de matière présente une densité infinie, et sa gravité est elle aussi infinie. Les mathématiciens désignent une telle entité sous le nom de *singularité*. Or, dès que surgit le mot « infini » dans une théorie physique... méfiance ! Le signal d'alarme est tiré, suggérant que quelque chose de catastrophique pourrait se produire. Dans ce cas, personne ne sait vraiment quoi. Je vous reparlerai plus loin des singularités. Pour l'instant, il est suffisant de se souvenir que peu importe le sort ultime de la sphère, il n'affecte pas son champ gravitationnel. Sa gravité ne disparaît pas sous prétexte qu'elle a implosé ! Résultat, comme le sourire de l'invisible et facétieux

chat de Cheshire dans *Alice au pays des merveilles*, l'existence passée de la sphère laisse une empreinte dans l'univers sous la forme de son redoutable champ gravitationnel...

Venons-en à présent à l'autre propriété qui caractérise les trous noirs : leur noirceur.

Dans le chapitre 1, j'expliquais comment la gravitation ralentissait le temps. Plus le champ gravitationnel est fort, plus la distorsion temporelle est importante. Pensez à ce qui se produit au niveau de la surface de la sphère qui se contracte. Le facteur de ralentissement augmente alors que le rayon diminue. Quand le rayon de la sphère approche une valeur critique – environ trois kilomètres pour un objet d'une masse solaire – la distorsion temporelle devient infinie ! Tout cela pour dire que la marche du temps à la surface de la sphère s'arrête par rapport au temps qui lui s'écoule toujours sur Terre... Une horloge à la surface de la sphère apparaîtrait, de loin, comme étant figée en une immobilité totale.

Évidemment, aucune horloge conçue par la main de l'homme ne pourrait résister aux gigantesques forces impliquées ici. Mais les ondes lumineuses peuvent être considérées comme un type d'horloge (leurs ondulations imitant le balancement d'un pendule). Donc la lumière venue d'une étoile qui se contracte présente une fréquence décroissante lorsque la distorsion temporelle – s'intensifiant – retarde ses oscillations. Convertie en couleurs, la lumière de la sphère en contraction devient de plus en plus rouge, jusqu'à ce qu'elle disparaisse complètement comme les dernières braises d'un feu qui meurt... À la fin du processus, le reste de la lumière de l'étoile s'échappe et tout devient obscur. La région de l'espace autour de l'objet effondré est alors noire, vide, d'où l'expression « trou noir ».

La façon dont j'ai décrit la disparition de la sphère donne l'impression que le phénomène, observé depuis la Terre (par Sally, notre jumelle, pourquoi pas), est plutôt lent. En réalité, pour une étoile d'une masse solaire par exemple, le temps de disparition ne dépasse pas quelques centièmes de milliseconde. Sally verrait donc le cœur de l'étoile disparaître en un instant (en supposant qu'elle puisse effectivement en apercevoir le cœur), et la région de l'espace où la boule de matière se trouvait, occupée par une sphère noire sans caractère distinctif... par un trou noir, oui !



7 | Quand le rayon de la sphère approche une valeur critique, la distorsion temporelle devient infinie.

Un autre observateur – Sam – resté à la surface de l'étoile en contraction (et suffisamment malchanceux pour l'accompagner dans le trou noir), expérimenterait les événements de manière très différente... Aucun ralentissement temporel pour lui. Souvenez-vous : le temps est relatif. Du coup, dans ce cas, les deux témoignages de Sally et de Sam seraient *infinitement* différents – à cause de la distorsion temporelle infinie ! Sally assiste à l'effondrement de l'étoile en une boule noire de trois kilomètres qui se fige éternellement. Sam, lui, voit l'étoile se contracter en « rien » en un clin d'œil. En ce qui le concerne, durant la fraction de seconde pendant laquelle l'étoile implose au-delà du rayon critique, une éternité se sera écoulée dans le reste de l'univers...

La formation d'une distorsion temporelle *infinie* autour d'une boule de matière en implosion conduit à une conclusion saisissante :

Un trou noir est un voyage à sens unique vers nulle part.

Souvenez-vous de ceci, il est impossible de tomber dans un trou noir et d'en ressortir, car la région à l'intérieur va *au-delà de la fin des temps*. Si vous tentiez malgré tout de vous en échapper, le mieux serait... d'avoir filer avant de tomber dedans ! Autre manière de dire que vous seriez projeté dans le passé.

Indication précieuse ici : le trou noir a une entrée, mais pas de sortie. Il s'agit d'une voie rapide à sens unique vers la fin des temps.

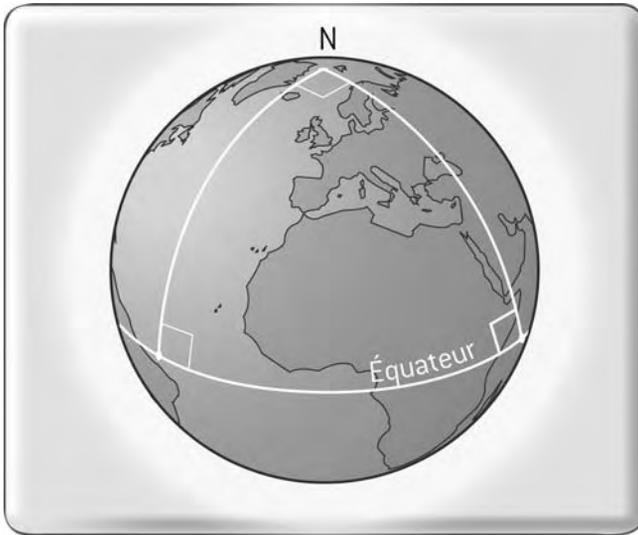
Imaginons maintenant l'équivalent d'un trou noir qui, lui, présenterait une sortie et une entrée, typiquement un trou de ver. Peut-être pourrait-il être utilisé pour rejoindre le passé ?

TROUS DE VER ET ESPACE COURBE

Dans le but d'expliquer ce qu'est un trou de ver, je dois d'abord décrire comment la gravitation affecte aussi bien l'espace que le temps. La théorie de la relativité exige que l'espace et le temps soient tous deux élastiques. Cela signifie que l'espace peut lui aussi s'étirer. Voilà qui explique plus ou moins l'expansion de l'univers... L'espace ayant trois dimensions, son élasticité peut produire une plus large gamme de déformations que l'étirement et la contraction. Hé oui, l'espace peut également être incurvé !

Espace courbe, de quoi s'agit-il ? À l'école, nous apprenons les règles de géométrie euclidiennes, établies par Euclide. Exemple, la somme des trois angles d'un triangle est égale à la somme de deux angles droits, soit 180 degrés. Ces règles euclidiennes s'appliquent aux formes géométriques sur les tableaux noirs et dans les livres d'exercice (plats eux aussi). Mais sur une surface incurvée, les règles de géométrie sont différentes. Ainsi, sur celle de la Terre, il est possible de dessiner un triangle comportant trois angles droits (270 degrés), le sommet du triangle étant au pôle Nord, et le côté opposé sur l'équateur. Les navigateurs connaissent ses subtilités et savent pertinemment qu'il faut utiliser des règles de géométrie différentes sur la surface terrestre (sphérique). Des règles similaires peuvent être appliquées dans un espace en trois dimensions s'il est déformé de façon appropriée.

Pour donner un exemple, imaginez tracer un triangle *plat* autour du Soleil. Quelle est la somme des angles de ce triangle ? Beaucoup diraient « 180 degrés ». Or, selon la théorie de la relativité, la réponse devrait être « un peu moins de 180 degrés » car la gravité du Soleil courbe l'espace autour de lui. L'effet est très faible : quelques secondes d'arc pour un triangle dans lequel



8 | Il est possible de tracer sur une surface sphérique un triangle comportant trois angles droits.

s'inscrit le Soleil (encore moins pour un triangle plus grand). Malgré tout, la déformation peut être mesurée non par le dessin d'un triangle bien sûr, mais par l'observation de rayons lumineux ou de signaux radars passant près du Soleil. Parfois, l'effet est décrit de la sorte: la gravité du Soleil courbe les rayons de lumière. Mais il est plus précis de penser l'espace lui-même comme étant courbe, et la lumière suivant le trajet le plus court à travers cette géométrie courbe.

La courbure de l'espace autour du Soleil est à peine perceptible. Une très grosse distorsion spatiale nécessite en effet l'intervention d'un champ gravitationnel beaucoup plus intense (comme celui d'une galaxie entière contenant des milliards d'étoiles). Parfois, par chance, on observe depuis la Terre une galaxie s'aligner

exactement devant une autre. Dans ce cas, le champ gravitationnel de la galaxie intervenant fait office de lentille, courbant la lumière de la galaxie la plus distante et la concentrant. Le résultat est un effet de halo connu sous le nom d'anneau d'Einstein. À la surface d'un trou noir ayant la masse du Soleil, la gravité est environ cent milliards de fois plus forte qu'à la surface du Soleil. L'espace est déformé de façon spectaculaire !

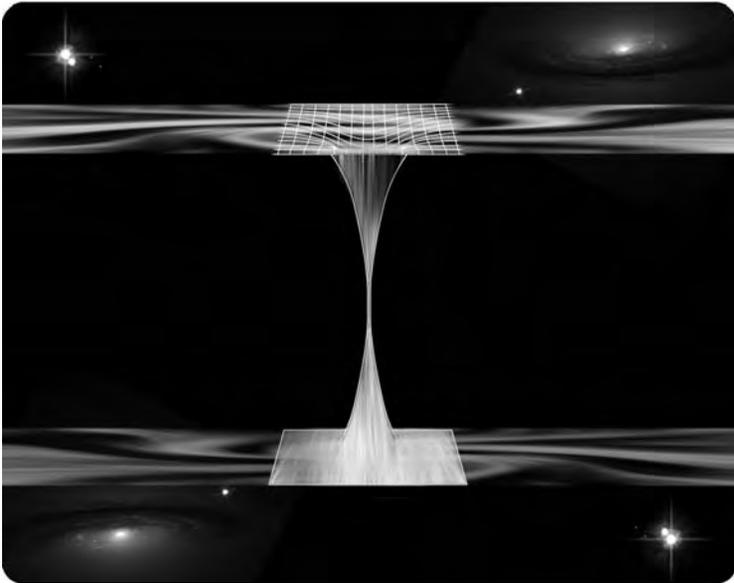
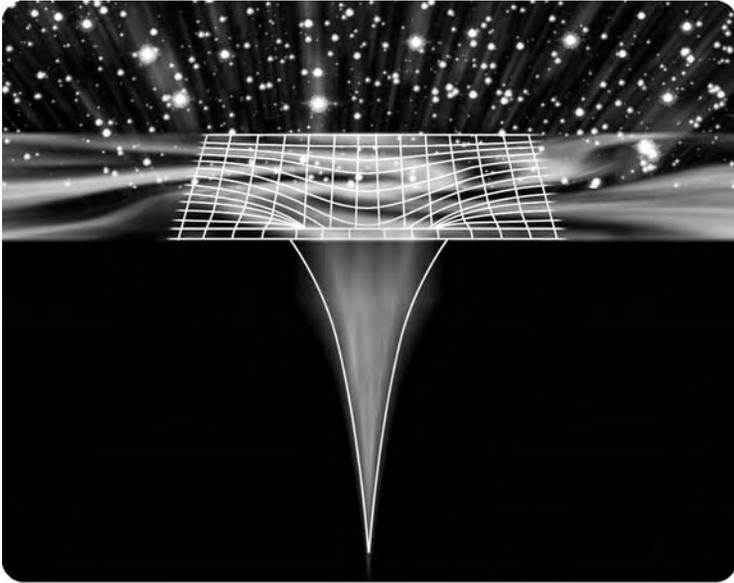
Une manière de représenter l'espace élastique près d'un objet massif est l'analogie avec une feuille de caoutchouc. Celle-ci est placée horizontalement avec une dépression en son centre engendrée par la présence d'une balle lourde. Cette image peut représenter la distorsion spatiale créée par le Soleil par exemple. Une balle plus petite envoyée sur la feuille – dont la trajectoire passera au niveau de la surface déformée – voyagera selon un trajet incurvé autour de la dépression (comme la Terre se déplaçant en orbite courbe autour du Soleil). Bien sûr, ici, la feuille représente seulement deux dimensions de l'espace. En réalité, la gravité du Soleil courbe l'espace dans les *trois* dimensions mais il est difficile de présenter le phénomène en image (au sens strict, elle déforme les *quatre* dimensions de l'espace-temps, voir ci-dessous).

Imaginez qu'à la place du Soleil se trouve un trou noir. La feuille de caoutchouc s'incurve cette fois de façon spectaculaire, en une sorte de puits gravitationnel apparemment sans fond. De nombreuses hypothèses ont été avancées au sujet de ce fond, si fond il y a... Il pourrait s'agir de ce qu'on appelle une singularité, un bord de l'espace-temps ! Dès 1916, le physicien autrichien Ludwig Flamm étudie la géométrie de l'espace à l'intérieur et autour de ce que nous appellerions aujourd'hui un trou noir, bien que le terme ne fut pas inventé avant 1968.

Plus tard, en 1935, Einstein et son collaborateur Nathan Rosen revisitent le sujet. La forme présentée dans la figure 9 devient alors le pont d'Einstein-Rosen. Aujourd'hui, une structure de cette forme générale est appelée « trou de ver », et sa portion étroite au centre, « gorge ». Loin du trou noir, la feuille (de caoutchouc pour reprendre l'image) est presque plane, car l'effet de sa gravité est faible ici. Quand on s'approche du trou, la courbure augmente, et la feuille prend la forme d'un puits, puits qui au lieu de plonger indéfiniment vers le bas s'ouvre à nouveau pour constituer une seconde surface en dessous.

Voilà qui est inattendu ! Qu'allons-nous faire de cette partie inférieure ? Quelle est l'importance de cette région de l'espace ? La meilleure façon de la décrire est de parler d'un « autre univers ». Il a fallu attendre les années 1960, avec les travaux de George Szekeres en Australie et Martin Kruskal aux États-Unis, pour avoir une compréhension correcte de ses caractéristiques... Certes intrigant, l'« autre univers » lié au nôtre par le trou de ver ne devrait pas être pris trop au sérieux, étant le fruit d'un modèle mathématique idéalisé... Son origine remonte à 1916, à une solution des équations d'Einstein découverte par Karl Schwarzschild pour représenter le champ gravitationnel dans l'espace vide en dehors d'une étoile. Il ne s'applique pas à l'intérieur d'une étoile. Si vous essayez de raccorder la solution de Schwarzschild à une autre décrivant les entrailles d'une étoile, toute la moitié inférieure du trou de ver est éliminée. Même en permettant à l'étoile de s'effondrer en une singularité, vous ne créez pas cette seconde portion.

Seule façon pour un trou de ver – dans son intégralité – d'avoir un sens physique ? Compter sur la générosité de Dame Nature qui, d'une manière ou d'une autre, aurait produit



9 | De nombreuses hypothèses ont été avancées sur ce qui se cache au fond d'un trou noir. Peut-être s'ouvre-t-il à nouveau pour former un trou de ver.

l'univers ainsi, avec le trou de ver enchevêtré dedans ! Quand bien même... Il reste un souci : le trou de ver ne reste pas sans bouger, il évolue avec le temps. Au départ, les deux univers sont disjoints. Ensuite, ils se connectent en un seul point correspondant à une singularité où la courbure de l'espace est infinie. Cela ressemble beaucoup à la singularité issue de l'effondrement d'une sphère en un point de densité infinie. En revanche, ici, il n'y a pas d'effondrement de sphère, seulement un espace vide.

À partir de ce commencement singulier, la gorge du trou de ver s'élargit pour une durée limitée. Après quoi elle se referme à nouveau et les deux univers se séparent... D'une importance cruciale, cette séquence se déroule si rapidement que rien ne peut traverser le trou de ver avant que la gorge ne se referme en se pinçant. La lumière elle-même ne peut passer d'un univers à l'autre dans ce laps de temps ! Ainsi, un observateur dans notre propre univers ne pourrait pas même apercevoir « l'autre univers ». Alors pour ce qui est de le visiter... Voilà qui rend l'existence de « l'autre univers » plus qu'hypothétique, étant donné que les deux univers – les « feuillets » du haut et du bas du trou de ver – ne peuvent en aucun cas influencer l'un sur l'autre. N'importe quel astronaute assez stupide pour sauter dans le trou noir finirait dans la singularité, au centre, et totalement pulvérisé !

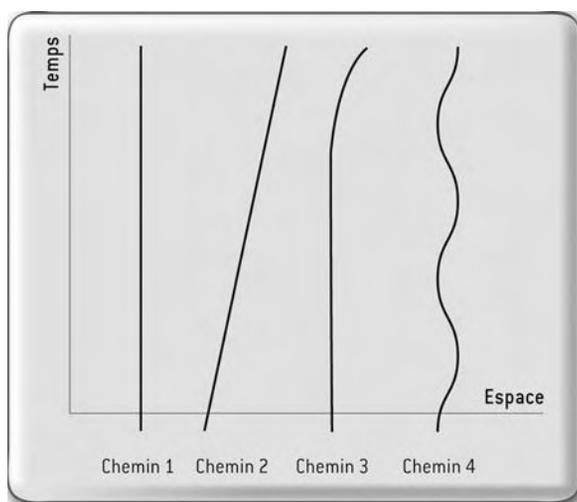
ESPACE-TEMPS COURBE

J'ai décrit ce que signifiait pour l'espace et le temps, individuellement, être déformé par la gravitation. Mais il est plus précis de les considérer ensemble dans une description unifiée.

Le concept d'*espace-temps* n'est pas spécialement complexe à concevoir. Dans le cas présenté ici (figure 10), le temps est étiré verticalement, l'espace, horizontalement. Pour faciliter la représentation, j'ai seulement présenté l'espace en une dimension. Les lignes sur le graphique sont les trajectoires d'objets physiques dans l'espace-temps. La trajectoire 1 est celle d'un corps resté au repos alors que le temps s'écoule. La trajectoire 2 est celle d'un corps se déplaçant à vitesse constante vers la droite. La trajectoire 3 est celle d'un corps en accélération vers la droite. Le trait ondulé appelé trajectoire 4 représente un corps se déplaçant alternativement en avant et en arrière.

Que pouvons-nous en déduire à propos des phénomènes physiques sous-jacents ? Depuis Newton, on sait qu'un corps accélère seulement si une force agit sur lui. Ainsi, les trajectoires courbes représentées sur un tel schéma de l'espace-temps impliquent la présence de forces physiques. La trajectoire 4 par exemple nécessite l'application d'une force d'action pousser-tirer alternante pour faire zigzaguer le corps.

La gravitation est une force physique parmi d'autres. La grande intuition d'Einstein a été de saisir que la gravitation diffère des autres forces à un égard essentiel : elle affecte tous les corps de manière identique. À ce propos, il existe une histoire célèbre, celle de Galilée et son étude de la chute des corps. Il laissa tomber des corps lourds et brillants depuis la tour penchée de Pise afin de convaincre les plus sceptiques que les objets toucheraient le sol au même moment... Comment cela se traduirait-il sur un graphique de l'espace-temps ? Lorsque la gravitation est la force d'accélération, tous les corps (brillants, lourds, chauds, froids, vivants, morts, etc.) auront la même trajectoire. La même chose pour un champ électrique par exemple ne serait pas vrai.

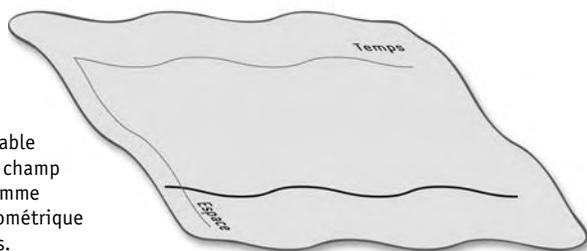
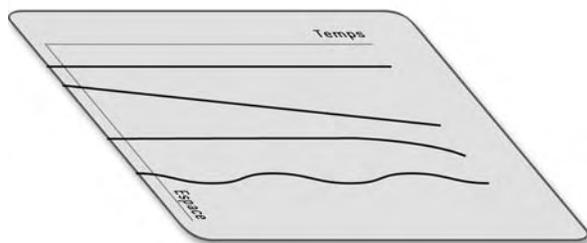


10 | Un espace-temps à deux dimensions. Les lignes représentent les trajectoires d'objets physiques dans l'espace-temps.

En effet, celui-ci accélérerait les particules chargées, mais laisserait les particules non chargées suivre un trajet en ligne droite dans l'espace-temps.

Einstein en déduisit que si l'effet de la gravitation sur les corps en mouvement était le même pour tous, il était préférable de représenter le champ gravitationnel non pas comme une force, mais comme une propriété géométrique de l'espace-temps. Mystérieuse idée qui est cependant facilement compréhensible... Ici (figure 11), j'ai schématisé une feuille en deux dimensions contenant toujours ma représentation de l'espace-temps qui n'est pas plat mais courbe ou déformé. Il devient clair que déformer la feuille de manière indiquée imite l'effet de courbure des trajectoires. En d'autres termes, les zigzags d'une

trajectoire peuvent être obtenus soit en dessinant une ligne sinueuse sur une feuille plane, soit en traçant une ligne droite sur une feuille ondulée. Droit ici signifie « le plus droit », ce qui correspond au plus court chemin entre deux points sur une feuille ondulée. Einstein suggéra, dans le cas de la gravitation, qu'il était préférable de penser le champ gravitationnel de manière géométrique, plutôt que comme une force agissant dans l'espace-temps « plat ». Bien sûr, le faire correctement implique d'étendre à quatre dimensions (trois pour l'espace, une pour le temps) la notion de courbure de l'espace-temps, représentée ici en seulement deux dimensions, mais cela est simple mathématiquement.



11 | Il est préférable de représenter le champ gravitationnel comme une propriété géométrique de l'espace-temps.

TROUS DE VER : PORTAILS VERS UN AUTRE UNIVERS ?

Pour faire office de machine à explorer le temps, un trou de ver doit être traversable. Autrement dit, un explorateur du temps doit pouvoir passer au travers et en ressortir intact. Impossible avec le trou de ver de Schwarzschild, car il se referme avant que quoi que ce soit ait pu le traverser ! Néanmoins, le modèle entier suppose un espace vide et une symétrie sphérique parfaite. Supposons que nous soyons plus « souples » avec ces hypothèses.

Dans les années 1960, physiciens et mathématiciens ont commencé à étudier les propriétés des trous noirs *en rotation*. Ceux-ci s'élargissent au niveau de la partie centrale exactement comme les planètes en rotation à cause de la force centrifuge. Or, la force centrifuge agit pour s'opposer à la gravitation. La raison pour laquelle le trou de ver de Schwarzschild se referme si vite est l'intensité colossale du champ gravitationnel qui règne à l'intérieur. Mais grâce à cette rotation, l'effet de pincement est diminué, augmentant la chance que la gorge du trou de ver puisse rester ouverte suffisamment longtemps pour que quelque chose – ou quelqu'un – le franchisse. Il y a quarante ans, tout (du moins, les modèles mathématiques employés à l'époque) portait à croire que les trous noirs en rotation fourniraient des trous de ver traversables. Et les discussions, concernant le sort d'un astronaute tombé dans un trou noir en rotation et sorti dans un autre univers, allaient bon train.

Mais après quelques inspections plus minutieuses de ce scénario, les problèmes firent surface. Le premier, d'ordre pratique : n'importe quel astronaute s'élançant dans un trou noir risque d'être sacrément mutilé par les forces gravitationnelles intenses... Imaginez-vous, sautant d'un avion sans parachute et les

pieds devant. Comme la gravité de la Terre diminue avec l'altitude, vos pieds étant plus proches du sol, seront un peu plus tirés vers le bas que votre tête. Votre corps sera légèrement étiré en longueur. En même temps, vos épaules seront comprimées car chacune d'elle est attirée vers le centre de la Terre, Terre dont la courbure fera en sorte que vos épaules essayeront de tomber selon des trajectoires convergentes. Bref, vous vous transformerez en spaghetti !

Ce furent justement ce genre de forces gravitationnelles d'étiement et de pression qui brisèrent la comète Shoemaker-Levy 9 en fragments avant qu'elle n'entre en collision avec Jupiter en 1994. Près d'un trou noir d'une masse solaire, les effets seraient si forts qu'ils « spaghettifieraient » un astronaute en un temps très court. La « spaghettification » étant moins probable si le trou est plus gros, vous pourriez à peine survivre à une chute en surface d'un trou noir équivalent à dix mille masses solaires. Un trou noir supermassif d'un milliard de kilomètres ne représenterait plus un problème, sauf qu'un tel objet aurait une masse égale à celle d'une petite galaxie. Pas très pratique pour accéder à un autre univers !

Problème plus sérieux posé par la traversée d'un trou noir en rotation : le modèle idéalisé contenant le trou de ver ignore les effets de matière ou de rayonnements qui pourraient se trouver autour. Car il n'y a pas que les astronautes qui peuvent tomber dans le trou noir, mais également tout ce qui se présente, comme les rayons cosmiques ou la lumière des étoiles... L'intense champ gravitationnel du trou suralimente l'énergie de ces derniers au moment de l'aspiration, de quoi former un mur impénétrable au travers de la gorge du trou de ver. La gravité du mur entraînerait probablement l'effondrement du trou de ver, l'isolant en une singularité.



12 | Sautez dans un trou noir, vous vous transformerez en... spaghetti !

Ce n'est pas tout ! La force centrifuge d'un trou noir en rotation combat sa gravité à l'intérieur, mais pas suffisamment pour empêcher l'apparition d'une singularité... Au début de ce chapitre, j'expliquais comment une boule de matière parfaitement sphérique implosait en un point de densité infinie. Cette même boule, en rotation cette fois, ne serait plus parfaitement sphérique en raison de l'apparition d'un renflement autour de l'équateur. Du coup, elle s'effondrerait pour constituer une singularité en forme d'anneau à l'intérieur du trou ! Si pour un instant, nous

mettons de côté les problèmes mentionnés ci-dessus, un astronaute pourrait tomber dans le trou, échapper à la singularité et sortir dans un autre univers.

La simple idée qu'un astronaute puisse examiner de près une singularité et survivre à cette aventure pour la raconter terrifie les physiciens. Pris au pied de la lettre, la singularité d'un trou noir est une entité de densité infinie et de courbure spatiale infinie. L'espace et le temps ne peuvent s'y poursuivre. Par conséquent, les singularités sont des bords ou des limites à l'espace et/ou au temps. Littéralement, il n'existe *rien* au-delà : elles représentent des lieux où les objets et les influences physiques pourraient quitter l'univers ou y entrer. Un morceau de matière qui frappe une singularité et cesse d'exister, ce n'est pas très rassurant... Que penser alors d'un morceau de matière quittant spontanément une singularité ?

L'idée de disposer d'une région de l'espace à partir de laquelle quoi que ce soit puisse sortir sans cause, ni préavis, est simplement saisissante. Elle ne représenterait rien de moins qu'une rupture de l'ordre rationnel du cosmos ! Raison pour laquelle Sir Roger Penrose proposa une loi de nature pour interdire de telles invasions inopportunes. Il supposa que les singularités étaient si obscènes qu'elles devaient toujours être convenablement cachées par un trou noir... De cette manière, personne dans l'univers « extérieur » ne serait en mesure de voir une singularité. Et surtout, aucune influence sans cause physique ne pourrait surgir dans le vaste cosmos pour y commettre des ravages. Jamais non plus ne serait exposé le moindre bord de l'espace-temps au regard inquisiteur de tous...

Penrose appela cette interdiction la *conjecture de censure cosmique* :

Pas de singularités nues !

C'est là que se dresse le problème des trous noirs en rotation. Si vous pouviez tomber dans un tel trou, vous franchiriez en trombe l'anneau de singularité, et sortiriez à nouveau dans un autre univers. Vous, ainsi que tous les diabolins de la singularité qui pourraient vous accompagner... Mais alors, la singularité serait nue dans « l'autre univers » au mépris de la censure cosmique ?

Maintenant, il est vrai que ce n'est pas un théorème indiscutable qui interdit la traversée des trous noirs en rotation. Et personne n'a démontré l'hypothèse de la censure cosmique. Elle pourrait être fausse. Une singularité pourrait aussi être une fiction mathématique. Peut-être que la théorie de la relativité générale – ou même le concept d'espace-temps – se désagrège avant l'apparition de la formation d'une singularité ? D'ailleurs, et pour toutes les raisons précédentes, utiliser un trou noir en rotation comme porte d'entrée vers un autre univers paraît franchement suspect. Bref, si le but est de trouver un trou de ver traversable en toute sécurité, il nous faut autre chose – quelque chose qui soit capable de combattre la gravité avec plus de peps.

COMMENT PRODUIRE UN TROU DE VER TRAVERSABLE ?

Le concept de voyage dans le temps a démarré avec un livre de science-fiction. Depuis, il est resté fermement ancré à ce domaine. Jusqu'à récemment... Curieusement, ce qui a initié les recherches scientifiques sur le voyage temporel a été une autre oeuvre de

science-fiction. Au milieu des années 1980, l'astrophysicien Carl Sagan écrit *Contact*, une nouvelle qui sera plus tard portée à l'écran dans un film avec Jodie Foster en vedette. L'histoire ne concerne pas précisément le voyage temporel, mais un message radio envoyé par une civilisation extraterrestre supérieure. Celui-ci contient les plans d'une machine destinée à créer un passage spatio-temporel entre la Terre et une étoile située à vingt-six années-lumière : Vega. Ce trou de ver est ensuite exploité par une équipe de scientifiques pour voyager et aller à la rencontre des extraterrestres. Sagan emploie le concept du trou de ver comme un élément de fiction afin de contourner ce vieil épouvantail de la science-fiction : la limite de la vitesse de la lumière. Résultat, dans *Contact*, les scientifiques atteignent Vega en quelques minutes seulement !

Le trou de ver de Sagan diffère de ceux que j'ai évoqués précédemment. Ces derniers étaient supposés être des portes d'entrée sur un autre univers. Le trou de ver de Sagan, lui, est un tunnel reliant deux points dans le même univers. D'ailleurs, Sagan se contente de donner de maigres détails sur sa conception. Dans la version filmée, Jodie Foster monte à bord d'une capsule et se trouve suspendue dans ce qui ressemble fort à un gigantesque mixeur de cuisine. Après quoi elle traverse un tunnel étroit et ressort quelque part dans la galaxie. Fabuleux, mais réalisable ou pas ? Intrigué, Sagan a voulu savoir si utiliser un trou de ver comme raccourci à travers l'espace interstellaire avait une quelconque crédibilité scientifique. Il fit part de ses interrogations à son ami, le physicien théoricien Kip Thorne de l'Institut de technologie en Californie.

Thorne et ses collègues se mirent d'accord pour enquêter sur ce qui était nécessaire pour faire de la vision de Sagan une réalité.

Pour ce faire, il leur fallut adopter une approche d'ingénierie inversée par rapport à la théorie gravitationnelle. D'habitude, un physicien considère un objet à l'origine d'un champ gravitationnel – une étoile par exemple – et se sert de la théorie de la relativité générale pour en déterminer les caractéristiques. Ne reste plus ensuite qu'à prédire comment l'espace sera incurvé près de l'objet...

Sur ce projet, Thorne commença par mettre la réponse par écrit. Il connaissait le genre de géométrie de l'espace nécessaire ici : quelque chose ayant la forme d'un trou de ver avec deux bouches sphériques. Il devait s'agir d'un trou de ver *inoffensif*, le genre de trous de ver restant ouverts suffisamment longtemps, pour permettre à Jodie Foster de le traverser sans être réduite en pièces par les forces gravitationnelles, ni carbonisée par les surfaces d'énergie infinie... Évidemment, les trous de ver évoqués précédemment ne pouvant faire l'affaire, Thorne se demanda quel type de matière serait susceptible de générer ce trou de ver inoffensif.

Rapidement, il devint clair qu'aucune des formes de matières familières (eau, diamant, gaz hydrogène, lumière, neutrinos, etc.) ne sortaient son épingle du jeu. Et dans tous les cas, la matière en question ferait s'effondrer la gorge du trou de ver avant que rien n'ait le temps de la franchir ! Manifestement, il devenait indispensable de trouver une forme de matière exotique.

Ce n'est pas compliqué à comprendre, vous allez voir... Si un trou de ver est traversable, il doit, en plus d'une entrée, disposer d'une sortie. Dans ce cas, il doit être possible de faire passer de la lumière au travers. La raison pour laquelle un trou noir n'a pas de sortie, c'est que sa gravité courbe la lumière vers l'intérieur, la piégeant et la faisant converger vers la singularité. Puisque le trou

de ver permet à la lumière de sortir à l'autre extrémité, quelque part à l'intérieur la lumière devra *diverger* (autrement dit, être courbée vers l'extérieur).

Thorne réalisa que la solution pour arriver à un tel résultat était d'utiliser une sorte d'*antigravité*. Pas de surprise ici : quelque chose de puissant est nécessaire pour soutenir le trou de ver, combattre l'inexorable tendance de la gravité à écraser le trou de ver et à le pincer en une singularité. Une matière engendrant de l'antigravité est donc une solution. Mais existe-t-elle ?

En fait, oui, et depuis longtemps dans le folklore... La lévitation est un vieux mythe et figure dans de nombreuses religions et croyances mystiques du monde entier. D'ailleurs, l'antigravité reste, pour les amateurs d'ovnis, un concept révolutionnaire pour la propulsion des vaisseaux extraterrestres ! Elle fascine aussi toutes sortes de penseurs indépendants, d'inventeurs en herbe et d'investisseurs visionnaires, obsédés par le rêve de neutraliser la gravité sur Terre et de flotter vers les étoiles sans avoir besoin de fusées. L'antigravité pointe également son nez en science-fiction. Dans *Les Premiers Hommes dans la Lune*, H. G. Wells imagine un bouclier antigravité qu'il appelle « Cavorite ».

Côté science dure, c'est à Einstein que l'on doit la première apparition de l'antigravité. En 1917, il arrange sa propre théorie de la relativité générale pour y incorporer une forme de gravitation répulsive et produire un modèle de l'univers. À cet instant, personne ne sait que l'univers est en expansion. Einstein, à l'instar de Newton, est intrigué par le fait que l'univers puisse être réellement statique alors que la seule véritable force cosmique est la gravitation (et que celle-ci est universellement attractive). Il ajoute un terme à ses équations sur le champ gravitationnel pour décrire un type d'antigravité. En contrebalançant la force

attractive de la gravité classique par la force répulsive de l'antigravité, on pourrait obtenir un univers statique.

Une fois qu'il découvre que l'univers n'est pas statique mais en expansion, Einstein abandonne cette idée de force répulsive, la plus grosse gaffe de sa vie dira-t-il. Comble de l'ironie, il pourrait avoir eu raison... Bien que l'antigravité ne soit plus nécessaire à un univers statique, la force répulsive pourrait bien exister (comme le suggère des données astronomiques récentes)! Cependant, sous sa forme cosmique, l'antigravité d'Einstein est encore trop faible pour aider à concevoir un trou de ver traversable.

L'antigravité fait également son apparition dans d'autres branches de la physique, bien que seulement en des circonstances inhabituelles. Dans la matière normale, la masse engendre la gravité. En raison du lien entre masse et énergie ($E = mc^2$), toutes les formes d'énergie en génèrent aussi. Pour obtenir cette fois de l'antigravité, il vous faut de l'énergie *négative*.

L'énergie positive génère de la gravité, l'énergie négative de l'antigravité.

À première vue, l'énergie négative semble aussi mystérieuse qu'un « déjeuner négatif ». Tout de même, soit on a déjeuné, soit non, n'est-ce pas? Comment peut-on avoir fait moins que de ne pas déjeuner?

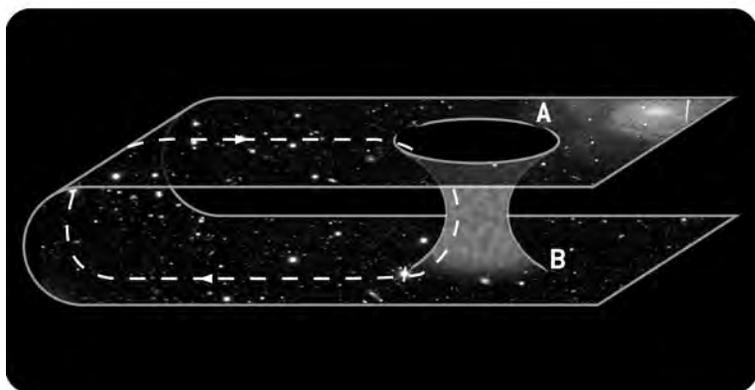
La réponse se trouve dans la définition de l'énergie zéro. Comme l'énergie génère la gravitation, l'énergie zéro doit correspondre à un état sans aucun champ gravitationnel... Dans la théorie de la relativité générale, cette condition implique l'absence de distorsions spatiales et temporelles: l'espace-temps est précisément plat. Donc, si nous pouvons concevoir une situation

physique dans laquelle l'énergie est inférieure à celle de l'état d'énergie zéro, l'énergie sera négative, et génèrera de l'antigravité.

Imaginez une boîte faite de matière ordinaire suffisamment remplie avec de l'énergie négative pour avoir une masse-énergie totale négative. Volerait-elle vers le haut au lieu de tomber vers le bas ? Hélas non. Effectivement, la boîte serait soumise à une force gravitationnelle ascendante, mais en raison de sa masse négative, elle se déplacerait vers la direction opposée, c'est-à-dire vers le bas ! Donc, l'énergie négative tombe exactement comme l'énergie positive. Et elle ne peut être utilisée pour s'élancer jusqu'aux étoiles...

Cependant, le champ gravitationnel que l'énergie négative crée elle-même est certainement répulsif. Ainsi, une balle constituée de matière normale placée près de la boîte serait accélérée et repoussée loin d'elle. Si la Terre était constituée d'énergie négative, nous serions tous expédiés dans l'espace !

Dans le chapitre 3, j'expliquerai comment peuvent être créés ces états d'énergie négative. Pour le moment, supposons que de la matière exotique appropriée soit disponible et qu'elle tapisse la gorge du trou de ver. Si l'antigravité qu'elle génère est suffisamment puissante, elle empêchera la gorge de s'effondrer et permettra à la lumière – voire mieux, aux astronautes ! – de passer au travers. La forme finale du trou de ver peut alors être représentée comme une feuille flexible en deux dimensions (figure 13). Cette fois, elle est recourbée jusqu'à ce que les deux extrémités se rapprochent puis se connectent par l'intermédiaire du trou de ver. De cette façon, les points A et B qui sont loin l'un de l'autre dans l'espace (peut-être à de nombreuses années-lumière...) peuvent être reliés par un modeste trou de ver, exactement comme dans *Contact* !



13 | Les deux extrémités A et B se rapprochent puis se connectent via le trou de ver.

Replier la feuille de la façon indiquée implique de courber radicalement une grosse portion de l'univers jusqu'à ce que ce dernier soit presque replié sur lui-même, tâche qui serait une épreuve même pour une supercivilisation ! En fait, la représentation est trompeuse à cet égard. Il est vrai que la gravitation courbe l'espace, mais la courbure ici n'est pas une distorsion spatiale gravitationnelle. L'acte de replier la feuille – ou même de la rouler en cylindre – n'affecte pas les propriétés géométriques à l'intérieur de la feuille elle-même.

Pour observer cela, imaginez dessiner des figures géométriques sur la feuille, triangles et carrés par exemple. Quand la feuille est simplement repliée, il n'y a ni étirement, ni contraction. Rien ne change en surface : tous les angles restent les mêmes, les carrés restent des carrés, et ainsi de suite. Comparez cela avec la tentative de coller la feuille sur la surface d'une sphère... Dans ce cas, il vous faudrait l'étirer ou la froisser,

modifier ainsi les angles, déformer les carrés et tout le reste. L'inverse est également vrai : pensez seulement aux déformations impliquées avec la projection de Mercator d'une carte de la Terre ! Les surfaces cylindriques n'ont pas de courbures intrinsèques, les surfaces sphériques, oui. Des constats similaires peuvent être faits avec leurs équivalents en trois dimensions.

Quand on en vient au trou de ver décrit ici, il n'y a pas de courbure intrinsèque dans la région de l'espace ordinaire ou « extérieur » entre A et B. Malgré le repliement, la géométrie ici demeure comme elle était – plus ou moins plane – avec des points dans l'espace restant séparés de la même distance, des angles inchangés, etc. Vous ne sauriez pas, en inspectant la géométrie de cette région ordinaire, qu'il s'y trouve un trou de ver joignant deux endroits largement séparés.

Thorne et ses collègues n'ont pas découvert quelque chose de fondamentalement incompatible avec l'idée d'un trou de ver traversable (aussi longtemps que certaines formes de matière exotique pourraient être utilisées). Et la matière nécessaire n'était pas *si* exotique que cela... On pense en réalité que certains systèmes physiques connus la possèdent, même en quantités minimes. C'était une découverte très importante. Cela ne prouvait pas que les trous de ver traversables pouvaient certainement exister, mais cela ne les écartait pas.

Voilà qui était déjà suffisamment palpitant ! Et ce n'était qu'un début... Une fois que les chercheurs ont digéré l'hypothèse de l'existence d'un trou de ver dans l'espace, est née en eux une autre idée : si l'on pouvait en faire un d'une manière ou d'une autre, il pourrait aussi servir de machine à explorer le temps. Comme avec un trou noir, le champ gravitationnel d'un trou de ver peut permettre d'atteindre le futur. Néanmoins, le trou de ver

peut faire plus encore. Il peut également être utilisé pour voyager vers le passé. En employant un trou de ver pour aller de A à B, il est possible de remonter le temps. Et en retournant rapidement dans l'espace ordinaire, vous pourriez revenir à A avant de l'avoir quitter ! Au moins, les physiciens ont découvert une manière plausible de voyager dans le passé et le futur. Mais comment construire une machine à explorer le temps sous forme d'un trou de ver ?

3

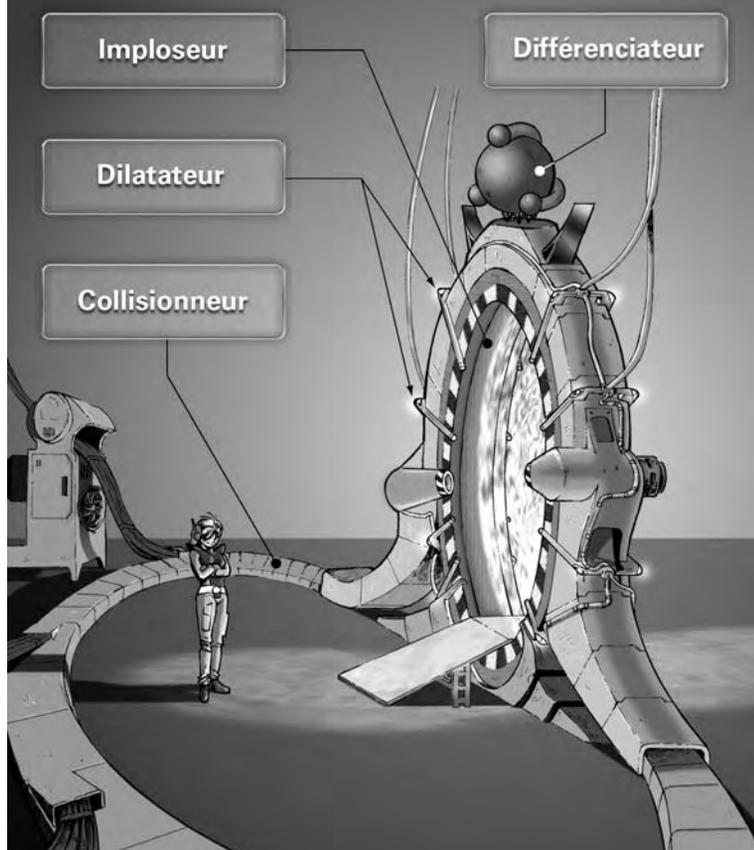
Comment construire une machine à explorer le temps ?

*Les trous de ver et les machines à explorer
le temps sont considérés aujourd'hui comme
extravagants par la plupart des physiciens.*

Kip Thorne

Des scientifiques pensent que des trous de ver pourraient avoir été formés naturellement lors du Big Bang. Ainsi, une civilisation avancée, voyageant dans l'espace, pourrait espérer découvrir un trou de ver dans la galaxie, et se l'accaparer pour en faire une machine à explorer le temps ! Évidemment, il serait plus commode d'en construire une de manière artificielle. Oui, mais comment ? Nous allons voir ensemble un plan de production possible. La construction se déroule en quatre étapes, une pour chaque élément de la machine à explorer le temps : collisionneur, imploseur, dilatateur et différenciateur. Intéressons-nous au fonctionnement de l'un après l'autre.

Éléments composant la machine à voyager dans le temps



14 | Comment construire un trou de ver traversable pour en faire une machine à explorer le temps ?

LE COLLISIONNEUR

Tenter de produire un trou de ver dans une région normale de l'espace-temps se heurte à un problème évident et fondamental. Imaginons la situation à l'aide d'une feuille de papier. Bien sûr, on peut la replier sans que les bords ne se touchent. Mais pour réaliser un trou de ver, il est impossible de relier les deux surfaces sans découper le papier et les coller ensemble. Que l'on torde, que l'on tourne, que l'on tire ou que l'on appuie sur le papier – peu importe – il faudra bien à un moment donné ou un autre le perforer. C'est la même chose que de transformer une balle de mastic en donut, célèbre beignet à trou. Il est impossible de ne pas « sacrifier » la balle. Y percer un trou est inévitable ! Cette difficulté est indépendante de la géométrie précise impliquée. Il s'agit d'une propriété de la topologie du système...

Revenons au trou de ver dans l'espace. La « feuille » représente l'espace lui-même. Il est primordial de comprendre que le trou de ver n'est pas un trou « au milieu de rien », mais qu'il est en réalité fait d'espace.

Comment poursuivre cette chirurgie sur l'espace ? À si grande échelle, personne ne le sait. Pensez un peu à ce que cela pourrait signifier de découper l'espace près de la Terre et d'exposer ainsi un « bord » coupé avant de recoller le tout ! Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, les « bords » de l'espace sont possibles. On les appelle singularités et on sait qu'il ne fait pas bon traîner dans leurs parages. Le trou de ver de Schwarzschild se forme à partir d'une singularité de densité infinie qui reste tapie à l'intérieur d'un trou noir. Pour fabriquer un trou de ver traversable, il nous faudrait un objet de ce type, *découvert* cette fois : une singularité

nue (justement le genre de choses qui pourraient chambouler la nature !) Dans tous les cas, obtenir un trou de ver en produisant des singularités dans l'espace-temps est trop violent et nous préférons procéder de manière contrôlée.

Y aurait-il une meilleure solution ? Employer le vide quantique. La mécanique quantique est basée sur le principe d'incertitude d'Heisenberg, lequel stipule que toutes les quantités physiques fluctuent au hasard. À l'échelle atomique, les propriétés – telles la vitesse ou l'énergie d'une particule – peuvent se révéler hautement incertaines. Et en règle générale, plus l'échelle est petite, plus les fluctuations sont importantes... Ainsi, à des tailles minuscules, l'incertitude quantique deviendra si importante qu'elle sera à l'origine d'effets gravitationnels considérables.



15 | Pour réaliser un trou de ver, il est impossible de relier les deux surfaces sans les découper et les coller ensemble.

Voyons cela pour l'énergie : selon le principe d'incertitude d'Heisenberg, l'énergie sera incertaine sur de courtes durées, ce qui signifie que sa valeur pourra varier de façon imprévisible. Une façon de représenter cette idée est de raisonner en terme d'emprunts. Par exemple, un électron peut emprunter de l'énergie à la nature, tant qu'il la rembourse dans un bref délai. L'essence de ce principe d'incertitude est la suivante : plus l'emprunt est élevé, plus le délai de remboursement est court.

Pour donner des chiffres, dans un temps aussi court que 10^{-43} seconde – connu sous le nom de « temps de Planck » (d'après le physicien allemand Max Planck qui a fondé la théorie quantique) – tant d'énergie pourrait être empruntée que sa masse déformerait considérablement l'espace-temps en y sculptant des structures élaborées. On ne sait pas exactement à quoi ressemblerait le résultat, mais John Wheeler en a donné l'image éclatante d'un labyrinthe de tubes et de tunnels qu'il a appelé de façon évocatrice *écume de l'espace-temps*. La taille de ces structures est de 10^{-33} centimètre (longueur connue sous le nom de « longueur de Planck »), extrêmement petite donc, soit dix puissance vingt fois plus petite qu'un noyau atomique !

Les trous de ver quantiques dont je parle ici ne sont pas enchâssés de manière permanente dans l'espace, car ils vivent sur ce fameux temps emprunté. L'énergie nécessaire pour courber l'espace en une écume complexe fait partie de l'emprunt, via le principe d'incertitude d'Heisenberg. Donc les trous de ver quantiques ne durent pas. Ils apparaissent et disparaissent à un rythme frénétique...

Concernant le problème de copier-coller mentionné précédemment, dans le domaine quantique, la difficulté des singularités est contournée. Les modifications dans la topologie sont

submergées par l'ensemble du flou quantique. Essayer de cerner avec précision où l'espace devrait être fendu est aussi inutile qu'essayer de localiser un électron sur une orbite atomique. De telles choses sont intrinsèquement indéterminées en physique quantique.

Pour différencier les trous de ver temporaires (fantomatiques trous de ver quantiques) des gros et vrais trous de ver permanents, les physiciens qualifient les premiers de *virtuels*. Un trou de ver virtuel existe sur un temps bref, selon le principe d'incertitude d'Heisenberg. Kip Thorne a suggéré qu'une civilisation avancée pourrait développer la technologie lui permettant d'atteindre l'écume de l'espace-temps, de lui arracher un trou de ver virtuel et d'en faire un vaste trou de ver permanent. Ce qui en gros reviendrait à prendre le contrôle de la nature sur une échelle de taille d'environ dix puissance quinze fois plus petite que nos capacités actuelles !

Inutile de dire qu'une approche directe paraît sans espoir... Pourquoi pas indirecte dans ce cas ? Problème, concernant la « récolte » des trous de ver virtuels dans l'écume de l'espace-temps, ceux-ci, typiquement, ne durent pas plus du temps de Planck avant de disparaître. De fait, pour créer un trou de ver permanent, nous devons injecter de manière artificielle suffisamment d'énergie dans l'écume de l'espace-temps pour effacer la dette du trou de ver virtuel, et ainsi, le transformer en véritable trou de ver. Cela vous semble fantaisiste ? Et pourtant... Nous reproduisons la même chose avec les émetteurs radio. En effet, un champ électrique peut être envisagé comme un nuage de photons virtuels se précipitant autour d'une particule chargée telle qu'un électron. Si de l'énergie est apportée au système, par l'accélération de l'électron dans un fil par exemple, alors certains

des photons virtuels vont se transformer en véritables photons et s'échapper du fil sous forme d'ondes radio.

Le principe d'incertitude d'Heisenberg a également d'importantes implications sur la nature de l'espace vide. Ainsi, il n'existe pas de vide parfait. Même lorsque vous retirez toutes les particules de matière et tous les photons, il existe encore des photons virtuels (et des versions virtuelles de tous les autres types de particules) à l'existence temporaire... Les particules virtuelles se répandent dans l'ensemble de l'espace, le remplissant d'activités quantiques bouillonnantes. Conclusion, ce qui devrait d'abord sembler être du vide total est en fait une ruche de fantômes fluctuants, apparaissant et disparaissant dans d'imprévisibles ébats ! Il ne s'agit pas seulement d'une théorie... Les photons virtuels se manifestent physiquement de différentes manières. Par exemple, ils bousculent les électrons dans les orbites atomiques, déclenchant de petites (mais mesurables) modifications dans les niveaux d'énergie. Ils sont également responsables de ce que l'on appelle *l'effet Casimir* dont je parlerai plus loin dans ce chapitre.



Le vide parfait



...enfin presque

16 | Le principe d'incertitude d'Heisenberg a pour conséquence qu'il n'existe pas de vide parfait.

Le collisionneur est la première étape pour fournir l'énergie nécessaire à l'écume de l'espace-temps. Il implique un accélérateur d'ions lourds du même type que celui qui est utilisé au Laboratoire national de Brookhaven, à Long Island (New York). Cette machine est conçue pour accélérer les noyaux d'atomes, tels que l'or et l'uranium, à des énergies colossales, puis les faire entrer de plein fouet en collision. Les noyaux sont confinés par des champs électriques dans un tube vide en forme d'anneau. À l'intérieur, ils sont accélérés à l'aide d'impulsions électriques de façon à ce que des faisceaux de noyaux en contre-rotation entrent en contact à très haute vitesse. Les collisions sont conçues pour être si violentes qu'elles recréent un court instant les conditions qui prévalaient dans l'univers une microseconde après le Big Bang (quand la température, épouvantable, s'élevait à 10^{13} degrés) !

Lorsque les noyaux se brisent les uns contre les autres, leurs constituants – protons et neutrons – sont pulvérisés. Le choc crée une bulle de fragments pleins d'énergie connue sous le nom de plasma quark-gluon (parfois, certains emploient l'expression spectaculaire de « fusion du vide quantique »). En effet, les composants des particules nucléaires – quarks et gluons – se séparent et grouillent librement à l'intérieur d'une sorte de bouillon amorphe.

Une fois la bulle de plasma quark-gluon créée, l'étape suivante consiste à la faire passer dans l'imploseur.

L'IMPLOSEUR

Selon nos critères actuels, un plasma quark-gluon est très riche en énergie. Cependant, nous sommes loin du compte pour

atteindre nos objectifs. La température colossale de 10^{13} degrés à l'intérieur de la bulle est encore dix puissance dix-neuf fois trop basse pour affecter l'écume spatio-temporelle ! Aussi, si nous voulons faire grimper la température aux valeurs de Planck, nous devons comprimer la bulle d'un facteur d'un milliard de milliard. Aussi incroyable que cela paraisse, l'énergie totale impliquée dans l'obtention de cet état est modeste : environ dix milliards de joules, l'équivalent en sortie d'une centrale électrique pendant seulement quelques secondes. Du coup, l'énergie n'est pas un facteur limitant sur cette étape. Le vrai challenge est plutôt de concentrer toute cette énergie dans un si petit objet...

Comment faire ? Pas simple, mais la striction magnétique explosive est une possibilité à explorer. Les champs magnétiques sont employés pour confiner des plasmas conventionnels de basse énergie (comme les gaz ionisés). Si le champ est intensifié, le plasma est comprimé. Les scientifiques ont commencé l'expérimentation avec cette technique connue sous le nom de striction axiale – on parle aussi de Z-pinch – au début des années 1950. Elle faisait partie du programme destiné à développer la fusion nucléaire contrôlée. Dans une chambre, une forte décharge électrique est envoyée au travers d'un gaz de deutérium. Elle l'ionise rapidement. Par la suite, le champ magnétique du courant va comprimer violemment le plasma obtenu, et le chauffer à des millions de degrés. Le système de Z-pinch le plus affiné à l'heure actuelle se trouve au Laboratoire national de Sandia au Nouveau-Mexique. Les impulsions électriques de cinquante mille milliards de watts issues d'une banque de condensateurs chargés y sont concentrées sur des fils de tungstène ultrafins.

Le type de compression nécessaire pour atteindre la température de Planck demande bien plus d'énergie que le système de

Sandia n'est capable d'en fournir... Un rassemblement de bombes thermonucléaires arrangées selon un modèle sphérique centré sur sa cible pourrait être capable de concentrer un champ magnétique suffisant pour faire imploser la bulle de quark-gluon. Rappelons-le, l'énergie totale nécessaire n'est pas si grande. Il faut simplement la diriger sur la bulle ciblée plutôt que de la laisser s'éparpiller aux alentours. Supposons que ce problème de concentration puisse être résolu, le résultat sera la création d'une sphère minuscule d'une densité d'environ 10^{97} kilogrammes par mètre cube, soit une densité dix puissance quatre-vingts fois plus grande que la densité de la matière nucléaire ! Voilà qui est suffisant pour rivaliser avec les énormes fluctuations d'énergie permises à la longueur de Planck (10^{-33} centimètre), distance parcourue par la lumière pendant le temps de Planck. Le résultat attendu sera soit la formation d'un mini trou noir, soit celle d'un trou de ver qui pourra devenir la « graine » d'une future machine à explorer le temps...

Pour réaliser cette compression, il faut – en plus des défis technologiques que cela représente – surmonter de sérieux problèmes de physique fondamentale. La théorie quantique des champs suggère en effet que si un champ magnétique devient trop fort, il peut commencer à engendrer des particules subatomiques et à se dissiper lui-même. De plus, on sait que la striction magnétique est instable. Ces difficultés pourraient être contournées en utilisant un autre type de champs, le champ de Higgs par exemple sur lequel travaillent, non sans passion, les physiciens des particules.

Autre alternative : utiliser un accélérateur à la place d'un imploseur. Toutefois, pour espérer obtenir l'énergie de Planck avec l'aide de la technologie électromagnétique conventionnelle,

il faudrait construire un accélérateur de la taille du système solaire ! Cependant, des techniques radicalement nouvelles sur ce genre d'appareils pourraient atteindre de très hautes énergies grâce à un équipement beaucoup plus compact. Aussi, certaines théories suggèrent-elles que des changements majeurs de l'espace et du temps pourraient se manifester à des énergies bien inférieures à celle de Planck, et qu'elles pourraient même se trouver à portée de la technologie à venir... Si la gravitation peut être manipulée à des niveaux d'énergie modestes, les trous de ver pourraient se former sans avoir besoin de recourir à des compressions ou accélérations si importantes.

Une fois que l'on dispose d'un trou de ver réel – même minuscule – la prochaine étape consiste à le dilater à des dimensions praticables.

LE DILATATEUR

Puisqu'un trou de ver de la taille de Planck est d'un point de vue pratique inutilisable, il faut tout simplement... l'agrandir. Nous l'avons vu, l'ingrédient essentiel à la stabilisation d'un trou de ver traversable est une sorte de matière exotique aux propriétés antigravitationnelles. Prochaine étape dans le processus de production : alimenter le mini trou de ver naissant avec de la matière exotique ! L'antigravité de celle-ci pousserait alors la gorge du trou de ver vers l'extérieur (augmentant sa taille). Voici ce que je propose : utiliser un groupe de lasers à haute puissance et un système de miroirs en rotation ultrarapide.

Avant d'en écrire davantage sur le dilatateur, il est nécessaire d'approfondir la notion d'antigravité. Ainsi, au cours du chapitre 2, j'expliquais comment il était possible d'en produire à l'aide

d'énergie négative. Question : comment créer de l'énergie négative ? Une méthode simple a été découverte par le physicien hollandais Hendrik Casimir en 1948. Voyons cela... Prenez deux plaques de métal et placez-les l'une près de l'autre, face à face. Fixez-les afin qu'elles ne bougent pas. À présent, enfermez l'ensemble du système dans une grosse boîte épaisse en métal de laquelle tous les autres matériaux – gaz et particules chargées électriquement et neutres compris – ont été retirés. Refroidissez le tout au zéro absolu (-273 degrés Celsius). La partie d'espace vide entre les plaques contient désormais de l'énergie négative.

Explication

L'effet Casimir est un phénomène du vide quantique. De manière stricte, je ne devrais pas le citer en exemple de *matière* exotique car il fait référence à un état d'espace vide. Mais il s'agit d'un chipotage terminologique : les distinctions entre excitations de champ, matière et vide sont très flous en physique quantique.

Voici pourquoi l'effet Casimir produit de l'énergie négative. L'espace apparemment vide entre les plaques n'est pas un vide complet, mais peuplé d'une masse bouillonnante de photons virtuels ! Comme leurs homologues (les vrais photons), les photons virtuels rebondissent sur les plaques métalliques. Mais pris en sandwich entre les plaques, ils ne sont pas libres de se déplacer dans n'importe quelle direction. Or, cette restriction a une incidence sur la variété de photons virtuels qui peuvent habiter la région interplaque (en comparaison de l'espace située en dehors des deux plaques). En effet, pour certaines sortes de photons virtuels, la possibilité d'exister est éliminée par la présence des plaques. Résultat, l'énergie totale « empruntée » (via le principe d'incertitude d'Heisenberg) dans la région

interplaques est un peu moins importante qu'elle ne l'aurait été sans les plaques. Si nous acceptons le fait qu'apparemment, l'espace vide sans les plaques présente exactement une énergie nulle, alors la région entre les plaques doit avoir une énergie négative. L'énergie négative se manifeste en produisant une minuscule force d'attraction entre les plaques.

Est-ce réalisable ?

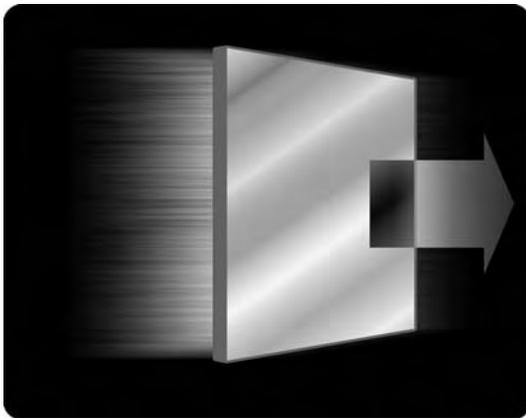
Oui ! La force de Casimir a pour la première fois été mesurée en laboratoire en 1958. Depuis, elle a été étudiée à de nombreuses reprises. Dans ces expérimentations, aucune tentative n'a été faite pour retirer toutes les autres sources d'énergie (plus importantes et positives) pénétrant le système, car le but ici était de tester la prédiction théorique de Casimir, pas de créer une région d'énergie négative... Les expériences ont donc confirmé la théorie. La force d'attraction entre deux plaques parfaitement réfléchissantes d'un mètre carré de surface chacune distantes d'un centième de millimètre correspond à un poids de seulement un millionième de gramme. Mais la force augmente lorsque les plaques se rapprochent. Avec de vraies feuilles de métal (qui ne sont jamais parfaitement planes), d'autres facteurs influencent l'effet avant que la force de Casimir ne s'intensifie. Néanmoins, cela n'a pas empêché certaines théories inventives de jouer avec l'idée d'utiliser l'effet Casimir et d'autres effets de vide quantique comme la base d'un système de propulsion d'un vaisseau spatial.

D'autres manières de produire de l'énergie négative

L'effet Casimir est la méthode la plus célèbre et la plus commode pour produire de l'énergie négative en perturbant le

vide quantique. Il existe d'autres possibilités. Elle peut être créée à l'aide d'une unique surface réfléchissante (un miroir) si celle-ci est déplacée de manière dynamique. Au milieu des années 1970, je me suis personnellement penché sur cet effet de « miroir mobile » avec mon collaborateur Stephen Fulling. Nous avons limité notre étude à un modèle simple à une dimension. Cependant, des résultats similaires seraient probablement observés dans l'espace à trois dimensions. Nous avons découvert que si un miroir est déplacé avec une accélération croissante, un flux d'énergie négative émane de sa surface et s'écoule dans l'espace devant le miroir. Hélas, l'effet est extrêmement faible. Et ce ne serait pas une technique très pratique pour produire de grandes quantités d'énergie négative.

Pour finir, le générateur d'énergie négative le plus prometteur est certainement le laser, une source très énergétique de lumière pure, ou cohérente. Dans un système typique, un rayon laser traverse un cristal de niobate de lithium en forme de cylindre aux



17 | L'énergie négative peut être créée à partir d'un unique miroir mobile.

extrémités arrondies argentées pour réfléchir la lumière, le tout constituant une sorte de cavité à résonance optique. Le cristal produit un rayon secondaire de fréquence inférieure dans lequel les photons sont réorganisés par paire. Techniquement, on appelle cela « comprimer » la lumière. En terme d'énergie, la lumière « comprimée » qui émerge contient des impulsions d'énergie négative entremêlées d'impulsions d'énergie positive.

Les cristaux ne sont pas les seuls à pouvoir comprimer la lumière... Si l'on pouvait concevoir des impulsions de lumière très fiables, contenant spécifiquement un, deux, trois, etc. photons chacun, celles-ci pourraient être combinées ensemble de façon à créer sur commande des états comprimés de la lumière. En superposant de nombreux états de ce type, des bouffées d'intense énergie pourraient théoriquement être produites.

Le hic avec l'utilisation de lasers? La courte durée d'impulsions d'énergie négative. Typiquement, une impulsion dure 10^{-15} seconde, après quoi elle est suivie d'une impulsion d'énergie positive de durée similaire. Des méthodes doivent être inventées pour séparer les parties positive et négative du rayon laser. Le dispositif de dilatation que je propose utilise une série de miroirs en rotation rapide, la lumière frappant chaque surface de miroir à un angle très serré. La rotation ferait en sorte que la partie d'énergie négative du rayon soit réfléchi à un angle légèrement différent de la partie d'énergie positive. À grande distance du miroir, il y aurait une petite séparation des composantes positive et négative du rayon. Un système supplémentaire de réflecteurs permettrait à la partie négative seule d'être dirigée dans le trou de ver.

Avec la technologie actuelle du laser, les chiffres paraissent décevants. Même si l'énergie négative peut effectivement être

envoyée en direction d'un trou de ver de manière prolongée, et d'une façon ou d'une autre, piégée par la gorge, il faudrait énormément de temps pour en accumuler suffisamment et produire un trou de ver macroscopique. Le physicien théoricien Matt Visser a estimé que, pour former un trou de ver d'un mètre de diamètre, les besoins en énergie négative seraient équivalents à... la masse de Jupiter ! Avec une séparation parfaite des composantes d'énergie positive et négative issues d'un million de lasers térawatt fonctionnant à plein régime et en continu, le temps nécessaire à l'accumulation d'autant d'énergie négative serait supérieur à la durée écoulée depuis la naissance de l'univers.

AUTRES SYSTÈMES DE DILATATION

L'énergie négative du vide quantique apparaît également comme un sous-produit de certains champs gravitationnels. Un exemple simple : le champ gravitationnel de la Terre. Il produit un nuage d'énergie négative autour d'elle en attirant certains des photons virtuels vers le bas. Dans le cas de la Terre, l'effet est extrêmement faible. Mais lorsque le champ gravitationnel augmente, le nuage d'énergie négative s'intensifie à son tour. Près de la surface d'un trou noir, il est énorme. Un trou noir n'ayant pas de surface matérielle – seulement de l'espace vide – cette énergie négative s'écoule dans le trou noir en un courant constant. Le trou noir aspire le vide quantique !

Un trou noir d'une masse solaire, et de trois kilomètres de rayon, aspire l'énergie négative à la vitesse d'un milliard de milliard de milliardième de joule par seconde. Plutôt faible, n'est-ce pas... Mais plus le trou noir est petit, plus la gravité est forte à sa surface, et plus l'énergie négative qui l'entoure est

intense. Un trou noir de la taille d'un noyau atomique (et de la masse d'une montagne !) avalerait l'énergie négative au rythme d'un milliard de joules par seconde environ, créant un puits d'énergie d'un million de kilowatts.

L'existence d'énergie négative à proximité d'un trou noir a été supposée par Stephen Hawking en 1974. Hawking prédisait qu'un trou noir devait émettre un faible rayonnement thermique... L'énergie émise devait venir de quelque part, et comme rien – pas même de l'énergie – ne peut s'échapper d'un trou noir, la seule explication devait être que de l'énergie négative pénétrait à l'intérieur ! L'année suivante, William Unruh, Stephen Fulling et moi-même confirmions l'hypothèse en calculant, grâce à un modèle mathématique simplifié à deux dimensions, la quantité d'énergie présente à proximité d'un trou noir. Nous avons découvert qu'il existe en effet un flux d'énergie négative vers le trou à un rythme compensant exactement le rayonnement thermique qui en sort.

Malheureusement, poster notre centre de production de machines à explorer le temps près de la surface d'un trou noir pour en absorber l'énergie négative est difficilement concevable... Consolation : l'existence d'énergie quantique négative générée par des champs gravitationnels est d'une importance considérable ! Le trou de ver lui-même ayant un champ gravitationnel puissant, il se peut qu'il génère l'énergie négative nécessaire à partir du vide quantique. Personne ne sait si une telle chose est possible ou non. Si elle l'est en tous cas, le trou de ver pourrait être amené à s'auto-dilater grâce à une minuscule entrée de matière exotique ! Le système laser pourrait être utilisé pour démarrer le processus, configurant la géométrie du mini trou de ver à la forme appropriée. Ensuite, la nature ferait le

reste, livrant gratuitement un grand trou de ver. Le trou de ver surgirait de l'écume de l'espace-temps sans qu'il ne soit nécessaire de rien payer ! Si cela semble surprenant, souvenez-vous que l'énergie négative a une masse négative. De fait, la masse totale du trou de ver est proche de zéro. En d'autres termes, le coût d'énergie de production d'un trou de ver serait faible ou nul car les parties d'énergie négative payeraient pour les parties d'énergie positive. Dans ce cas, un gros trou de ver pourrait être généré spontanément, pour peu que les ingénieurs règlent finement le système de dilatation...

Pour produire une machine à explorer le temps fonctionnelle, l'essentiel est de conserver la gorge du trou de ver ouverte. Mais utiliser un trou de ver comme moyen de transport sûr pour un être humain nécessite qu'il soit plus qu'une simple porte d'entrée vers d'autres temps et d'autres lieux. En clair, un individu doit pouvoir le traverser et en ressortir tout sourire. Aussi, pour éviter la « spaghettification » de ses utilisateurs, le champ gravitationnel d'un trou de ver doit rester léger, et la durée de la traversée raisonnable... Un voyage dans le passé qui se ferait en cent ans n'aurait rien de très avantageux ! Conséquence, les longs trous de ver sont d'emblée hors jeu.

Ces deux exigences imposent des restrictions supplémentaires sur la matière exotique à employer. Du coup, les experts se disputent au sujet du degré d'exotisme de cette fameuse matière exotique : doit-elle être confinée dans une petite région au fond de la gorge du trou de ver ? Peut-elle émaner de ses bouches ? Comment peut-elle être confinée ? Est-ce que l'émission de rayonnement par l'une des bouches du trou de ver peut entrer dans l'autre bouche et suivre continuellement un circuit fermé ? Etc.

Supposons que toutes ces difficultés puissent être surmontées. Enfin, nous voici avec un trou de ver sûr et court à la sortie du dilatateur ! Étape finale : le convertir en machine à explorer le temps. C'est ici qu'entre en scène le différenciateur.

LE DIFFÉRENCIATEUR

Pour transformer un trou de ver en machine à explorer le temps, vous devez établir une différence de temps permanente entre les deux extrémités. Technique la plus simple ? Utiliser l'effet de dilatation du temps (souvenez-vous : les jumeaux...) Pour cela, on fournit une charge électrique au mini trou de ver (par exemple, en envoyant des électrons à l'intérieur) lorsqu'il est encore de la taille d'une particule subatomique. L'une de ses bouches est alors introduite dans un accélérateur de particules circulaire ordinaire. On la fait ensuite tourner à une vitesse proche de celle de la lumière, tandis que l'autre bouche reste maintenue en place. L'action produit une divergence temporelle croissante entre les deux extrémités du trou de ver. Le processus suit son cours durant dix ans par exemple. Enfin, la bouche mobile est mise au repos puis autorisée à approcher l'autre bouche du trou de ver... Désormais, ce dernier est capable d'envoyer des particules de matière dans le temps dix ans en arrière. Dans l'étape finale du processus, le trou de ver est renvoyé vers le dilatateur afin d'être élargi à une taille suffisamment importante (disons dix mètres de diamètre) pour qu'un être humain le traverse. La longueur du trou de ver, elle, est conservée aussi courte que possible.

Une autre façon de transformer le trou de ver en machine à explorer le temps est d'utiliser le champ gravitationnel d'une

étoile à neutrons comme différenciateur, plutôt qu'un accélérateur. Comment cela fonctionne ? Imaginez un trou de ver plutôt court, de dix mètres de long. Remorquez une extrémité – appelons-la A – dans les environs proches d'une étoile à neutrons située à quelques années-lumière de là. Laissez l'autre extrémité – appelons-la B – garée dans notre système solaire. Gardez ce système tel quel jusqu'à ce que la distorsion temporelle provoquée par la gravité de l'étoile à neutrons soit suffisante, puis remorquez A jusque dans notre système solaire et garez-la à côté de B. La machine à explorer le temps est maintenant prête à l'emploi !

Pour comprendre pourquoi cette manipulation est efficace, imaginez des horloges identiques placées à chaque bouche du trou de ver. La gravité de l'étoile à neutrons dilate le temps au niveau de la bouche A : l'horloge va ralentir. Quid de l'horloge en B ? Se trouvant à quelques années-lumière de l'étoile, son rythme ne devrait pas être affecté par la gravité colossale de celle-ci. Résultat, elle devrait tourner considérablement plus vite que l'horloge en A. Oui, mais attention, il y a un piège... Supposons que nous regardions au travers du trou de ver depuis la bouche A située à proximité de l'étoile. Nous voyons alors l'horloge B à seulement quelques mètres de là. Ainsi, par un itinéraire, l'horloge en B est très éloignée de l'étoile à neutrons ; par l'autre, elle en est très proche ! Si elle est regardée comme très proche, alors le temps en B devrait également être ralenti par la gravité de l'étoile. Il ne devrait y avoir qu'une très légère différence entre le rythme des horloges A et B. Mystère : quel scénario est correct ? Les deux en fait ! Le temps, après tout, est relatif. Or, la situation ici est la suivante : vu au travers du trou de ver, le temps est à peu près le même à chaque extrémité, mais vu au travers de l'espace extérieur, la différence de temps entre A et B (l'horloge B avançant

par rapport à A) est considérable. Si maintenant, vous sautez à travers le trou de ver de A vers B, vous irez dix ans en arrière. En retournant en A par l'espace « normal », vous pourriez revenir à votre point de départ avant de l'avoir quitté. En définitive, une fois de plus, en réalisant une boucle fermée dans l'espace, vous en réalisez une dans le temps... Cette machine à explorer le temps fonctionne dans les deux sens. En passant au travers du trou de ver dans l'autre direction – de B vers A – vous pouvez sauter de dix ans vers le futur !

Le trou de ver à explorer le temps diffère sur deux points essentiels de la version présentée par H. G. Wells. Tout d'abord, dans *La Machine à explorer le temps*, l'intrépide voyageur du



18 | La machine à explorer le temps fonctionne dans les deux sens.

temps actionne un levier, ce qui a pour effet de produire une avance rapide de l'univers (comme dans un jeu vidéo) accélérant le « film cosmique » par rapport au temps mental de l'explorateur. Lorsque celui-ci se trouve là où il le voulait, il appuie simplement sur le bouton Stop. Il voyage dans le passé en rembobinant le temps à grande vitesse. Quant à la machine à explorer le temps, elle aussi prend part au voyage temporel, bondissant dans le passé et le futur avec son pilote. Rien à voir avec le trou de ver donc, car lui ne se déplace pas dans le temps mais fait seulement partie de l'architecture cosmique...

Deuxièmement, dans l'histoire de Wells, le voyageur temporel ne se déplace pas dans l'espace. D'ailleurs, un instant de réflexion permet de remarquer l'ambiguïté de cet arrangement : dans le temps passé à voyager, la Terre aura bougé de plusieurs années-lumière à travers la galaxie, galaxie se déplaçant de manière relative aux autres. Comme il n'y a pas de repère absolu permettant de mesurer ces mouvements, la position de la machine à explorer le temps dans l'espace reste complètement indéterminée. Là encore, avec le trou de ver à explorer le temps, tout est différent. Plutôt que d'entraîner le temps à revenir en arrière, le voyageur temporel embarque pour un voyage dans l'espace qui s'achève dans le passé.

4

Comment donner un sens à tout ça ?

*Le temps présent et le temps passé
sont peut-être présents dans le temps futur,
et le temps futur contenu dans le temps passé.
T. S. Eliot*

Comme personne n'a encore avancé d'arguments incontestables pour démontrer l'impossibilité du voyage dans le temps – bien que les difficultés pratiques de la construction d'une telle machine puissent sembler décourageantes... – il faut faire face aux conséquences éventuelles d'un voyage dans le passé. Les auteurs de science-fiction sont habitués aux conséquences étranges et même paradoxales qui pourraient se produire si les gens visitaient le passé. Question : un voyage à double sens dans le temps pourrait-il être incorporé dans la science réelle ?

COMMENT ÉVITER LES TOURISTES TEMPORELS ?

Une objection qui saute aux yeux concernant l'éventualité de voyager dans le temps est justement que nous ne voyons pas grand monde – si ce n'est personne – venir du futur ! Or, s'il était effectivement possible de retourner dans le passé, nous pourrions espérer que nos descendants – peut-être venus de milliers d'années depuis le futur – aient fabriqué une machine à explorer le temps pour nous observer, ou nous parler d'eux, non ? Ainsi, les témoins auraient afflué en masse aux évènements clés de l'histoire comme la Crucifixion. Récits de fantômes, d'OVNI et autres excentricités mis à part, l'absence évidente de touristes temporels est un argument bien ennuyeux pour les passionnés du voyage dans le temps !

Heureusement, cette objection est facilement réglée dans le cas du trou de ver à explorer le temps. Bien que les trous de ver représentent des portes temporelles vers le passé et le futur, il est impossible d'en utiliser un pour visiter une époque avant qu'il ne soit conçu. Si nous en fabriquions un aujourd'hui, et établissons un écart de temps de cent ans par exemple entre ses deux extrémités, alors dans cent ans, quelqu'un pourrait revisiter 2007. Ce trou de ver serait bien sûr inutilisable pour retourner à l'époque des dinosaures. Par contre, si des trous de ver existaient déjà à l'état naturel, ou avaient été fabriqués il y a longtemps par une civilisation extraterrestre, nous pourrions visiter des époques passées. Si le premier trou de ver à explorer le temps était fabriqué en l'an 3000, il ne pourrait y avoir aucun touriste temporel en l'an 2000...

LES PARADOXES DU TEMPS

Changer le passé

Le plus célèbre de tous les paradoxes du voyage dans le temps est sans doute celui qui concerne le voyageur temporel retournant dans le passé pour tuer ces ancêtres, sa mère par exemple. Le problème devient évident. Si sa mère meurt avant de lui donner naissance, alors lui n'aurait jamais existé et se trouverait de fait dans l'impossibilité de commettre le meurtre. Or, si la femme vit, elle meurt, mais si elle meurt, c'est qu'elle vit ! D'une manière ou d'une autre, il en résulte une absurdité contradictoire.

De nombreuses histoires de voyages dans le temps se sont heurtées à cette incohérence ô combien épineuse. Dans le film *Retour vers le futur*, Marty McFly n'essaye pas de tuer sa mère, laquelle n'est encore qu'une jeune fille, mais se retrouve impliqué dans sa vie amoureuse au point de risquer d'interférer sur ses plans de mariage. Conséquence, il vacille et se retrouve sur le point d'être effacé de la réalité ! Évidemment, sa disparition ne résoud pas le paradoxe, car si effectivement il venait à disparaître, il lui aurait été impossible de visiter le passé et d'influencer l'histoire...

Des paradoxes comme celui-ci viennent du fait que le passé est lié au présent. Il l'est de manière causale. Ainsi, vous ne pouvez pas modifier le passé sans affecter le présent. On parle là de boucle causale... Comme le comportement de nombreux systèmes physiques est très sensible aux petits changements, un « bricolage » – même modeste – sur le passé pourrait conduire à de sérieux bouleversements sur le présent. Imaginez le monde aujourd'hui si Adolf Hitler avait été assassiné en 1939 ! Ou si la minuscule mutation génétique qui créa le premier être humain n'avait jamais eu lieu parce que l'hominidé concerné se serait

décalé d'un centimètre sur la gauche, évitant ainsi le rayon cosmique déclencheur de la transformation de l'espèce ! Dans l'histoire de Ray Bradbury, *Un coup de tonnerre*, un voyageur temporel part dans le passé à la rencontre des dinosaures. Provoquant accidentellement la mort d'un simple papillon, il déclenche toute une série d'événements qui transforment entièrement le cours de l'histoire.

Aussi longtemps qu'elles sont logiques, les boucles causales ne sont pas intrinsèquement paradoxales. *Changer* le passé reste manifestement paradoxal. Après tout, le passé est le passé. Pourtant, *affecter* le passé n'a rien de choquant du point de vue logique. Qu'est-ce que cela signifie ? Qu'il n'y a pas d'empêchement logique à ce que certains événements soient causés par d'autres ultérieurs (ou par un mélange d'événements ultérieurs). Par exemple, imaginez un riche investisseur, aventurier, dont l'énorme héritage provient d'un mystérieux bienfaiteur, lequel s'était lié d'amitié avec son arrière grand-mère un siècle auparavant. Notre chanceux investisseur finance un projet de machine à remonter dans le temps, utilise un prototype pour revenir en arrière dans le but de découvrir l'origine de sa fortune. Ne pouvant résister à l'envie de prouver son identité de voyageur temporel, il emporte avec lui un journal qu'il présente dûment à sa jeune arrière grand-mère. Animée d'un esprit d'entreprise, la dame s'intéresse aux cours de la Bourse mentionnés dans le journal, lecture qui lui permet de réaliser des placements fructueux. Vous l'avez compris : ses investissements sont la source de son immense richesse et de celle de son arrière petit-fils. Le voyageur temporel est donc lui-même son mystérieux bienfaiteur ! Il n'y a pas de paradoxe ici car la boucle causale est cohérente. Tout s'imbrique parfaitement.

Le paradoxe se présente seulement lorsque nous combinons des boucles causales à un libre-arbitre sans retenue. Car si le voyageur temporel estime qu'il est incapable de (ou qu'il ne souhaite pas) réaliser d'actes malveillants pouvant engendrer des séquences historiques incohérentes – tels le meurtre de sa mère par exemple – alors ce paradoxe particulier est évité.

Pourquoi le libre-arbitre serait-il limité? Il se pourrait que vous puissiez visiter le passé, mais qu'une fois arrivé sur place, vous vous trouviez continuellement coincé dans ce que vous essayez de réaliser. Si vous tentez de tuer votre mère par exemple, alors le pistolet va se bloquer, ou vous allez être arrêté avant pour comportement suspect, ainsi de suite. Ou peut-être que les désirs qui déterminent vos actes durant ce voyage dans le passé sont simplement dictés par ce qui est cohérent avec le monde futur duquel vous arrivez... Dans tous les cas, le libre-arbitre est un concept délicat, difficile à concilier avec les lois de la physique (même sans voyage temporel!) De nombreux scientifiques et philosophes le rejettent, voyant en lui une illusion.

Par ailleurs, il n'est pas nécessaire d'envoyer un être humain dans le passé pour déclencher des conséquences paradoxales. En principe, une simple particule (ou n'importe quelle infime influence physique) peut à elle seule semer la pagaille. Supposez qu'un système sensible soit programmé pour exploser si – et seulement si – il reçoit un signal venu du futur (une heure en avant). Signal qui soit par exemple l'arrivée d'un photon à une fréquence particulière... Le système est placé à côté de l'émetteur de photons. Du coup, envoyer un tel photon dans le passé déclencherait le système et détruirait l'émetteur. Or, si l'émetteur est détruit, cela signifie que le photon n'a jamais été envoyé, non? Nous sommes à nouveau face à une contradiction.

Si construire une machine à explorer le temps capable d'envoyer des êtres humains vers le passé était irréalisable, il pourrait encore être possible d'envoyer des signaux dans le passé... Une des premières spéculations à ce sujet est fondée sur l'existence de particules hypothétiques baptisées tachyons qui pourraient voyager plus vite que la lumière. Si l'on entend souvent dire que rien ne voyage plus vite que la lumière, au sens strict, ce n'est pas tout à fait vrai. Comme je l'expliquais dans le chapitre 1, la théorie de la relativité mentionne un mur de la lumière infranchissable. Une particule de matière ordinaire ne peut jamais être accélérée à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Si vous essayez de le faire, plutôt que d'aller de plus en plus vite, la particule deviendra seulement... de plus en plus lourde. Mais voilà, le mur de la lumière joue dans les deux sens : si quelque chose se déplace à une vitesse supraluminique, ce « quelque chose » ne pourra jamais ralentir à une vitesse inférieure à celle de la lumière ! Un tachyon est justement une telle entité coincée de l'autre côté du mur de la lumière, condamnée à se propager continuellement à une vitesse supraluminique.

Si les tachyons existent, et peuvent être manipulés, ils pourraient être utilisés pour envoyer un signal dans le passé. Précision, les y envoyer nécessiterait l'aide d'un complice. Voyons cela avec un exemple. D'abord, vous envoyez un signal à un ami à l'aide d'un rayon de tachyons voyageant à une vitesse dix fois supérieure à celle de la lumière (relativement à vous). Ensuite, votre ami renvoie immédiatement le signal à une vitesse à nouveau dix fois supérieure à celle de la lumière (relativement à lui). Si votre ami vient vers vous à une vitesse proche de celle de la lumière, le signal de retour vous atteindra *avant* que ne soit envoyé le signal d'origine !

Maintenant, quelles sont les chances que les tachyons existent réellement? La plupart des physiciens sont extrêmement sceptiques à ce propos. En manque de preuves expérimentales, on peut tout de même dire que s'ils existent, ils ont d'étranges propriétés. Par exemple, ils posséderaient une masse imaginaire (au sens mathématique) difficilement conciliable avec la mécanique quantique. Nous n'avons aucune garantie sur le fait qu'ils interagissent avec la matière ordinaire. Dans le cas contraire, il serait de toute façon impossible de les utiliser pour envoyer des signaux...

Et même si les tachyons n'existaient pas, on pourrait toujours utiliser les trous de ver ou d'autres systèmes pour envoyer des particules dans le passé... Imaginons une version «boule de billard» du paradoxe de la mère. Kip Thorne et ses collègues ont étudié les boucles temporelles sur le thème du billard. Dans ce jeu modifié, les poches de la table de billard représentent l'entrée et la sortie du trou de ver à explorer le temps. Imaginez une boule se diriger vers une poche, tomber dedans, et... sortir quelques instants *plus tôt* d'une autre poche de telle manière que la boule entre en collision avec elle-même! La collision dévie alors la boule de son trajet initiale, lui évitant de tomber dans la première poche. Ici, le libre-arbitre ne vient pas compliquer les choses, pourtant comme dans le paradoxe «matricide», la séquence décrite est incohérente et donc ne se produira pas.

D'ailleurs, le paradoxe peut être résolu. Nous pouvons imaginer une histoire légèrement différente. Ici, la boule démarre en se déplaçant de telle sorte qu'elle manquerait la première poche. Cependant, elle recevrait un coup oblique venu d'une boule sortie d'une seconde poche. La collision sert à dévier la boule de façon à ce qu'à présent, elle pénètre dans la première poche et sorte de la seconde un court instant avant sous l'aspect de la

boule qui délivre le coup oblique. Thorne a montré que cette séquence – une boule entrée en collision avec son double antérieur de manière à créer une boucle temporelle auto-cohérente – est parfaitement cohérente avec les lois de la physique. Plus perturbant, il a aussi montré qu’il existe plus d’une séquence cohérente d’événements. Lorsque des boucles causales sont présentes, les lois de la mécanique newtonienne ne prédisent plus une réalité unique.

Comment gagner de l’argent ?

Le voyage dans le passé prend des airs absurdes lorsque le voyageur temporel rencontre son double plus jeune. Il se retrouve en double exemplaire ! À noter : vous ne seriez même pas surpris de cette rencontre avec votre double plus jeune, puisque vous vous souviendriez déjà de ce tête-à-tête de jeunesse...

Mieux, la différence d’âge n’a pas besoin d’être importante. En principe, elle pourrait même être d’un seul jour. Dans cette situation, il existerait deux copies virtuellement identiques de vous-même. Insolite, n’est-ce pas ? Et cela pourrait aller encore plus loin. Vous pourriez inviter votre double à peine plus jeune que vous à vous accompagner pour un voyage temporel un jour de plus en arrière. Ainsi, cette fois, il y aurait trois copies identiques de vous-même ! Rien n’empêche ce processus d’être répété encore et encore. En définitive, réalisant des bonds successifs dans le passé, l’explorateur du temps pourrait accumuler de nombreuses copies de lui-même en un seul lieu.

Un tel scénario laisse entrevoir la possibilité de faire rapidement fortune. Prenez un lingot d’or et confiez-le à votre double plus jeune jusqu’à ce qu’il entame le voyage dans le temps. Vous obtenez alors deux lingots d’or. Sans grand effort, vous aurez



19 | Comment gagner de l'argent grâce au voyage dans le temps ?

doubler votre investissement. De cette manière, il est aussi facile de dupliquer les lingots d'or que les gens ! Du point de vue du physicien, dupliquer des entités est très perturbant car l'idée transgresse toutes les lois dites de conservation. Supposez que le lingot d'or soit remplacé par une particule chargée électriquement. Deux charges électriques seraient issues d'une seule. Voilà qui enfreint la loi de conservation de la charge électrique.

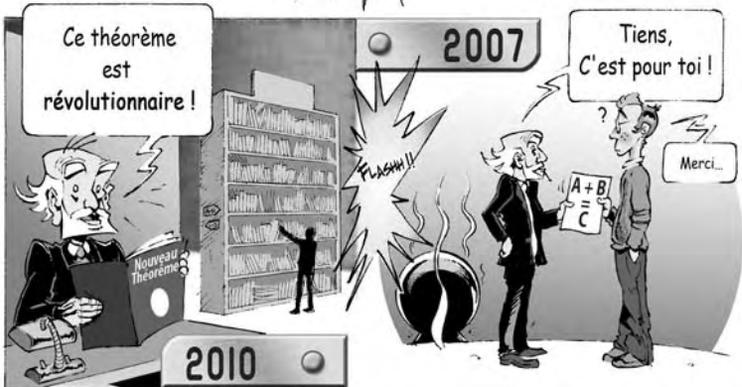
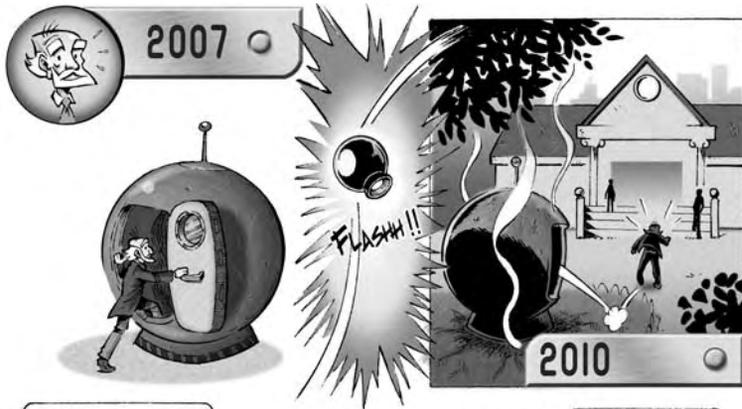
Le paradoxe est à nouveau évité grâce aux boucles temporelles auto-cohérentes. Exemple : une particule chargée positivement qui traverse un trou de ver y laissera son champ électrique, donnant au trou de ver une charge positive réelle à l'entrée (vers le futur), une autre négative en sortie (vers le passé). La charge négative annule précisément la charge positive supplémentaire que le voyage a créée dans le passé.

Comment s'approprier une connaissance « tombée du ciel » ?

Le plus déroutant de tous les paradoxes du voyage temporel est illustré par la parabole suivante... Un professeur construit une machine à explorer le temps en l'an 2007 et décide d'aller vers le futur – pas de problème jusque là – en 2010. Lorsqu'il arrive, il cherche la bibliothèque de l'université et parcourt les revues du moment. Dans la section Mathématiques, il remarque un nouveau théorème splendide. Il le recopie soigneusement et retourne en 2007. Là, il convoque un étudiant brillant et lui expose le théorème. L'étudiant s'en va, arrange le raisonnement, rédige un article et le fait publier dans une revue de mathématiques. Revue qui bien sûr n'est autre que celle dans laquelle le professeur a découvert le théorème en 2010 !

Aucune contradiction ici : l'histoire implique une boucle causale auto-cohérente. À proprement parler, il ne s'agit pas d'un paradoxe, seulement de circonstances troublantes. Le problème concerne plutôt l'origine de l'information. D'où vient exactement le théorème ? Pas du professeur, puisqu'il l'a simplement lu dans un journal, pas non plus de l'étudiant puisque lui l'a obtenu du professeur. Finalement, tout se passe comme si l'information concernant le théorème... « tombait du ciel » !

Je suis sûr que vous avez déjà entendu parler de ce paradoxe. Le fantasme du mouvement perpétuel fait courir d'excentriques inventeurs depuis très longtemps. Toutes les tentatives ont échoué pour des raisons liées à la première et la seconde loi de thermodynamique, lesquelles déclarent en résumé que l'on ne peut jamais obtenir plus d'un système fermé que ce que l'on y a injecté. Ainsi, les inventions proposées pour le mouvement perpétuel génèrent toujours des pertes de chaleur provenant des



frottements (et d'autres inefficacités). En fin de compte, le mouvement s'arrête. L'entropie – la perte de chaleur – et l'information sont étroitement liées. Techniquement, augmenter l'entropie s'apparente à perdre l'information. Bref, se voir offrir sans aucune contrepartie de l'information est, du point de vue du physicien, équivalent à une circulation spontanée de chaleur d'une source froide vers une source chaude : un vrai « miracle » !

Pour David Deutsch, expert en voyages temporels, l'information entrée « de nulle part » dans l'univers est l'un de ces « miracles » et, par conséquent, porte atteinte à la rationalité des lois ordonnées de la nature. Pour cette raison, il pense que le troisième paradoxe est probablement le plus troublant des trois. Peut-être devrions-nous le placer à côté du mouvement perpétuel et de la censure cosmique sur notre liste de paradoxes, puisque tous impliquent une information sans cause entrant « de nulle part » dans l'univers.

COMMENT FORMER UN AUTRE UNIVERS ?

Au cœur des paradoxes du voyage temporel se trouve le problème de causalité : ce qui s'est produit hier affecte ce qui se produit aujourd'hui. Revenez au jour d'hier, essayez de le modifier et vous prenez alors le risque, en réalisant des boucles causales problématiques, de modifier le jour d'aujourd'hui. Mais peut-être existe-t-il une solution plus complète que de limiter les boucles temporelles possibles à celles qui sont auto-cohérentes ?

La causalité n'est pas exactement le lien rigide que la plupart des gens imaginent... Au quotidien, le rapport entre cause et effet est indéniable. Néanmoins, le monde familier (tables, chaises, êtres humains, etc.) dissimule un micro-univers flou de

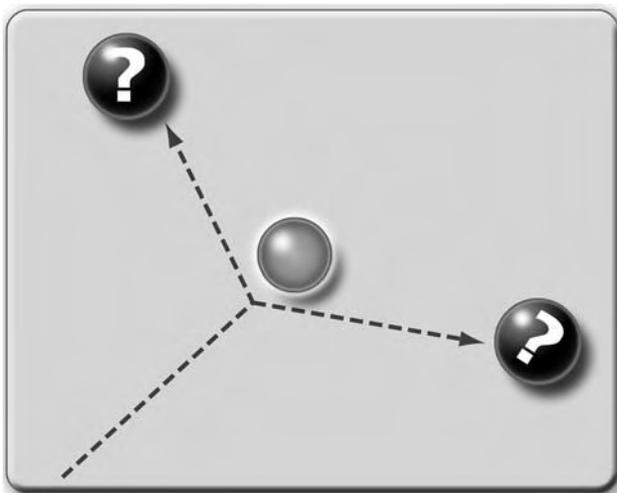
mécanique quantique dans lequel la relation de cause à effet est assez confuse (voir le chapitre 3)...

Le billard est un bel exemple de la relation de cause à effet. Frappez la boule avec un certain élan de façon à ce qu'elle entre en collision avec une autre boule à l'arrêt. En l'absence de boucle causale, le mouvement des deux boules, après collision, est totalement déterminé par la vitesse initiale et la direction prise par la première boule. Grâce aux lois du mouvement de Newton, vous pouvez calculer à l'avance ce qui se produira après la collision. En effet, ces lois sont strictement *déterministes* : l'état initial suffit à déterminer complètement l'état final. Et si l'expérience est répétée dans des conditions identiques, le résultat devrait être exactement le même. Autrement dit, si aujourd'hui la boule frappée tombe dans une poche particulière, elle le fera aussi demain (les conditions étant les mêmes). Par conséquent, le fonctionnement ordonné du macrocosme est assuré, ouf.

Les choses deviennent très différentes dès lors qu'on essaye de jouer au billard... avec des atomes ou des particules (comme des électrons et des protons). Aujourd'hui, un électron pourrait entrer en collision avec un proton et rebondir à gauche. Demain, dans des conditions identiques, il pourrait rebondir à droite. Les lois du mouvement de Newton ne s'appliquant pas ici, elles doivent être remplacées par des règles de mécanique quantique, qui sont elles *indéterministes*. En clair, l'état d'un système physique à un instant donné ne suffira généralement pas à déterminer ce qui arrivera l'instant suivant. L'incertitude dans le micro-univers est résumée par le principe d'incertitude d'Heisenberg (voir le chapitre 3). Bref, la prévision est une activité à magner avec des pincettes dans la théorie atomique ! Généralement, le mieux que l'on puisse faire est d'établir des

probabilités, c'est-à-dire de parier sur tel ou tel résultat. Un électron entré en collision avec un proton pourrait rebondir d'un angle parmi toute une série d'angles possibles, et plus probablement sur certains que d'autres... Finalement, la mécanique quantique donne un rapport précis de probabilités, mais n'annoncera généralement pas ce qui se produira dans un cas donné.

Les physiciens sont convaincus que l'incertitude quantique est intrinsèque à la nature, qu'elle n'est pas seulement le résultat de l'ignorance humaine des processus impliqués. En d'autres termes, l'électron lui-même ne sait pas avant la collision vers quelle direction il va rebondir. Et bien qu'il reste vrai de dire qu'une collision avec un proton entraîne une déviation de la trajectoire de l'électron, le lien causal est plutôt flou car la trajectoire finale réelle de l'électron est indéterminée.



Les simples collisions ne sont pas les seules à être incertaines en physique atomique. Toutes les réactions le sont ! Par exemple, un noyau de l'élément radioactif uranium pourrait (ou non) se désintégrer l'an prochain. Un atome frappant une barrière pourrait rebondir ou bien apparaître de l'autre côté (ayant mystérieusement creusé un tunnel à travers la barrière). Tout cela parce que le lieu où il se trouve précisément à n'importe quel instant demeure incertain.

Dans le monde des atomes et des particules subatomiques, l'incertitude quantique est une évidence. Pour des systèmes plus grands, la confusion est moins prononcée. Lorsqu'on passe à l'échelle de grosses molécules, les effets quantiques sont rarement très importants même si l'incertitude quantique ne disparaît jamais complètement... D'ailleurs, en principe, celle-ci s'applique même aux boules de billard !

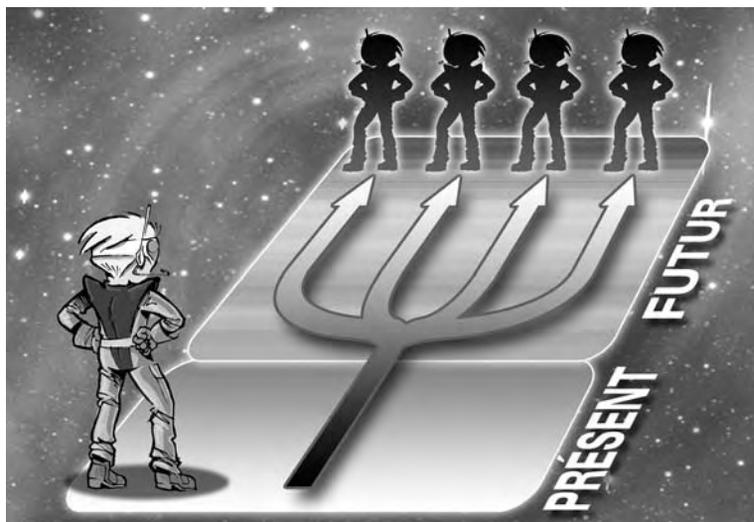
Si les événements dans le micro-univers quantique ne sont pas complètement fixés par la cause et l'effet, les paradoxes de la boucle causale associée au voyage temporel se présentent sous un nouveau jour. Il est possible de concevoir l'incertitude quantique en termes de mondes possibles. Un électron frappe un proton et peut rebondir soit à gauche, soit à droite. Deux mondes sont alors possibles : l'un avec un électron partant vers la gauche, l'autre avec un électron partant vers la droite. Plus généralement, une réaction atomique ou subatomique aura plusieurs résultats possibles (peut-être même un nombre infini) donc de nombreux univers alternatifs sont disponibles presque à chaque fois qu'il arrive quelque chose à une particule subatomique.

La question d'incertitude quantique se pose lorsque nous nous demandons : lequel des univers possibles correspond à

l'univers réel? Évidemment, nous ne pouvons le savoir à l'avance – c'est bien cela l'incertitude quantique! – mais la plupart des gens supposent qu'il ne peut y avoir qu'un seul monde *réel*, tous les autres représentant des mondes potentiels non réalisés... Si tel est le cas, se pose ensuite un problème profond concernant la connexion « en douceur » entre le monde quantique de multiples réalités potentielles et le monde classique (notre quotidien) d'une réalité unique.

Personne ne parvient à s'entendre sur la manière de réaliser cette connexion. De plus en plus de physiciens croient que la meilleure façon de l'approcher est de supposer que chacun de ces univers alternatifs est tout aussi réel que les autres. En d'autres termes, il n'est nul besoin de faire une transition de plusieurs mondes possibles vers un monde réel, car tous les mondes quantiques possibles existent vraiment! Dans cette interprétation « à univers multiples » de la mécanique quantique se trouve une infinité d'univers parallèles, chaque alternative quantique possible étant représentée dans un univers, quelque part... Il existera un univers dans lequel des atomes de votre corps seront situés à des places légèrement différentes, un autre dans lequel le président Kennedy n'aura pas été assassiné, d'autres encore qui ne compteront pas de planète Terre, etc. Chaque univers possible sera là quelque part, « là » ne signifiant pas en dehors de l'espace, mais en un certain sens « au côté de » notre espace-temps (donc il s'agira d'univers « parallèles »). Des millions et des millions de ces autres univers comporteront des copies de vous-même, chacune ayant le sentiment d'être unique et de vivre dans la seule vraie réalité...

Élucider les paradoxes du voyage dans le temps en invoquant des réalités parallèles a longtemps été un système employé par



22 | Des copies de vous-même qui pensent chacune être unique et vivre dans la seule vraie réalité.

les auteurs de science-fiction. L'idée de base? Le voyageur temporel interférant sur l'histoire, l'univers bifurque en deux branches (ou plus). David Deutsch fait partie des scientifiques qui proposent cette issue de secours. Il a montré que l'interprétation à univers multiples de la mécanique quantique résout les paradoxes du voyage dans le temps. Prenons le paradoxe matricide. Supposons que le voyageur temporel retourne dans le passé et commette le meurtre. Cette fois pas d'erreur ; la mère est bien morte. Mais quelle mère? Souvenez-vous : il existe toute une collection de mères parmi le nombre prodigieux de réalités parallèles... Dans le « multivers » de mondes parallèles quantiques, vous pourriez modifier le passé d'un monde parallèle en laissant votre propre monde intact ! En effet, l'acte

commis – le meurtre – divise la réalité en deux voies, l'une avec la mère décédée, l'autre avec la mère en vie. Mais les possibilités coexistent côte à côte dans l'immensité du multivers quantique. N'importe quelle « branche » du multivers (chacune étant une réalité spécifique) est parfaitement auto-cohérente, mais des interactions causales entre les branches n'ont pas besoin de respecter un ordre chronologique défini. Dans l'hypothèse de Deutsch, vous pouvez avoir le beurre et l'argent du beurre : le voyage dans le temps *et* un libre-arbitre sans entrave sont apparemment permis tous les deux !

L'intérêt d'invoquer le multivers quantique pour résoudre les paradoxes du voyage dans le temps divise les scientifiques. Pour certains, les réalités parallèles sont encore plus absurdes que les boucles temporelles (ils ne sont convaincus par aucune des deux théories). Mais que l'on accepte ou non l'interprétation à univers multiples de la mécanique quantique, la nature *obéit* à la mécanique quantique ! Et n'importe quelle analyse finale d'une situation physique doit être poursuivie à un niveau quantique. Les boucles causales survenant lors d'un voyage temporel semblent amplifier le phénomène quantique (normalement confiné au domaine atomique) au niveau de la vie quotidienne. Donc, nous ne pouvons pas éviter d'ajouter l'étrangeté de la réalité quantique à la bizarrerie du voyage dans le temps...

PROTECTION DE LA CHRONOLOGIE

Le voyage dans le temps peut paraître amusant pour les fans de science-fiction. Par contre, pour les physiciens, l'idée est absolument effrayante... Pour quelles raisons ? La pléthore de paradoxes que déclencherait un voyage dans le passé ! De plus, la

possibilité que les boucles causales puissent être imminentes semble si pathologique du point de vue des physiciens qu'elle produirait de profonds effets physiques. Si profonds en fait qu'ils pourraient empêcher toute tentative de créer une machine à explorer le temps... Parmi les théoriciens qui ont exprimé de sérieux doutes quant au fonctionnement de trous de ver ou autres machines à explorer le temps se trouve Stephen Hawking. C'est lui qui a proposé la « conjecture de protection chronologique », laquelle, plus simplement, raconte que la nature se présente toujours avec un obstacle destiné à empêcher tout voyage dans le passé (« rendant l'histoire sûre pour les historiens » comme il l'expliquait).

Qu'est-ce qui n'irait pas alors si une supercivilisation tentait de fabriquer une machine à explorer le temps sous la forme d'un trou de ver ? L'antigravité, par exemple, phénomène trop instable à maîtriser dans des scénarios réalistes... Démontrer que l'énergie négative est physiquement possible dans certaines circonstances inhabituelles est une chose. Mais c'en est une autre d'espérer la voir surgir à l'intérieur d'un trou de ver ou de tout autre système permettant d'explorer le temps avec la puissance nécessaire pour accomplir un tel voyage. Difficile de se prononcer sur le sujet : des études mathématiques suggèrent que l'antigravité dans les champs quantiques apparaît dans une gamme de circonstances assez large. Et pour le moment, il n'y a pas de théorème général indiquant précisément quelles sont les limites...

Même si l'antigravité (ou la matière exotique nécessaire) pouvait être déployée de manière appropriée, d'autres problèmes se manifesteraient. La matière exotique se répandant dans la gorge du trou de ver pourrait interagir avec de la matière

normale tentant de traverser le trou de ver, et gêner son développement ou le détruire.

Une autre difficulté concerne le comportement du vide quantique au voisinage d'un trou de ver (ou d'autres types de machines à explorer le temps) : la jonction entre la région de l'espace-temps autorisant les boucles causales d'une part, et d'autre part, celle de l'espace-temps « normal », là où passé et futur ne sont pas enchevêtrés. L'interface entre les deux est appelée *horizon chronologique*. Le franchir entraîne l'entrée à l'intérieur d'une région de l'espace-temps où les particules peuvent tourner et tourner indéfiniment dans des boucles causales. Ces particules en question comprennent les photons virtuels de l'état de vide quantique. Plus simplement, chaque fois qu'un photon virtuel effectue un circuit dans le temps, il double l'énergie empruntée. Des calculs montrent qu'à l'approche de l'horizon, les photons virtuels circulent autour de boucles causales presque fermées. Or, plus ils s'approchent de l'horizon, plus la fermeture des boucles risque de se produire. Étant donné les incertitudes inhérentes au comportement de particules quantiques comme les photons, l'horizon n'agit pas comme une frontière nette. La simple menace de fermeture causale imminente est suffisante pour relancer les photons virtuels sans limite, lesquels entassent de plus en plus d'énergie à l'approche de l'horizon ! Cette escalade galopante de l'énergie générerait probablement un immense champ gravitationnel qui déformerait l'espace-temps et détruirait la machine à voyager dans le temps... Je dis « probablement » car nous n'avons pas encore de théorie de la gravitation quantique suffisamment satisfaisante pour vérifier ce qu'il se produirait en effet en de pareilles circonstances. Du coup, l'argument-catastrophe du vide quantique est suggestif, mais

jusqu'ici, pas fatal. Pour l'instant, la conjecture de protection chronologique reste dans l'incertitude : espoir pour certains, pas très « sexy » pour d'autres !

MODÈLES ALTERNATIFS DE MACHINES À EXPLORER LE TEMPS

Le trou de ver reste le modèle de machines à explorer le temps privilégié. Mais ce n'est pas le seul. J'ai déjà évoqué le travail précurseur de van Stockum et Gödel sur la matière en rotation (voir le chapitre 2). J. Richard Gott III, lui, a proposé un projet bien différent : une machine à explorer le temps basée sur l'usage d'entités hypothétiques, les *cordes cosmiques*. Une corde cosmique est une sorte de fil de longueur astronomique, de masse considérable. Chaque kilomètre de corde cosmique pèserait environ autant que la Terre ! Certains cosmologistes croient que les cordes cosmiques pourraient avoir été formées lors du Big Bang, l'intense énergie primitive se répandant dans l'espace puis se trouvant piégée à l'intérieur de tubes microscopiques (et donc préservée pour l'éternité).

Les cordes cosmiques seraient faites de matière exotique. Dans ce cas, le caractère exotique de la corde ne serait pas une affaire d'énergie, mais de *pression*. D'ordinaire, nous ne voyons pas la pression comme source de gravitation. Pourtant, selon la théorie de la relativité générale d'Einstein, la pression crée également un champ gravitationnel. Si elle est vraiment énorme, la pression peut sur ce plan rivaliser avec l'énergie ! Or, il se trouve que la pression à l'intérieur d'une corde cosmique est énorme, et *négative*. Ce qui revient à dire que la corde est en tension. Comme la pression crée un champ gravitationnel, la tension (pression négative) génère de l'antigravité. Dans le cas d'un

segment droit de corde, l'antigravité de la tension annule exactement la gravitation de la masse-énergie. Résultat, malgré sa masse colossale, la corde n'exercerait aucune force gravitationnelle sur les corps aux alentours !

Néanmoins, la corde modifie encore la géométrie de l'espace dans ses environs. Et d'une manière plutôt caractéristique bien illustrée par la tradition de l'arbre de mai : lorsqu'un danseur du Premier Mai gambade fait un tour autour d'un arbre de mai fraîchement planté, il effectue une rotation complète sur 360 degrés. Si à la place, l'arbre de mai était une corde cosmique, le danseur reviendrait à son point de départ avant d'avoir effectué une rotation complète de 360 degrés ! Ainsi, un cercle dessiné autour d'une corde cosmique ne contient pas quatre angles droits (comme dans un cercle qui aurait été tracé sur un tableau noir).

Le déficit angulaire causé par une corde cosmique n'est, selon les prédictions, que de quelques secondes d'arc. Cependant, il est suffisant pour conduire à des effets distincts. Par exemple, deux lignes droites parallèles qui encadrent la corde finiront par converger. Si les lignes représentent des rayons de lumière provenant par exemple d'un quasar ou d'une galaxie distante, un observateur en verra deux copies de chaque si la corde s'interpose entre l'objet et l'observateur. De telles images, doubles, sont connues des astronomes mais peuvent aussi être produites d'autres manières. Le hic, c'est que nous n'avons pas encore de preuves concrètes de l'existence des cordes cosmiques... Malgré cela, elles restent très étudiées. Gott a fait remarqué que les photons d'une source distante (qui encadrent la corde et convergent) n'ont pas besoin d'arriver au point de croisement au même moment si la corde, la source et l'observateur ne sont pas précisément alignés ou sont en mouvement relatif. Pour cette raison, il serait possible

pour un astronaute de voyager à une vitesse très proche de celle de la lumière d'un côté de la corde et d'atteindre le point de convergence avant le photon arrivant de l'autre côté. De fait, l'astronaute aura devancé l'impulsion de lumière (plus lente) en prenant une route alternative à travers l'espace, comme dans le cas du trou de ver... Argument qui suggère que le voyage dans le temps à l'aide des cordes cosmiques pourrait être envisagé! Gott a prouvé mathématiquement que si deux cordes cosmiques parallèles se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière, il existera une région dans laquelle un astronaute pourrait voyager dans le passé en exécutant une boucle autour des cordes.

La suggestion de Gott n'est guère pratique et rencontre un certain nombre d'objections sur le plan physique. Par exemple, des cordes rectilignes infiniment longues n'existent pas, alors que des cordes en boucles finies menacent de s'effondrer en trou noir avant d'avoir pu devenir des machines à explorer le temps! Mais cette suggestion établit que le voyage dans le temps est une caractéristique générique de la théorie de la relativité d'Einstein, et pas seulement un scénario excentrique.

Gott est si enthousiasmé par l'idée des machines à explorer le temps qu'il va jusqu'à suggérer que le cosmos entier en soit une. Selon lui, alors l'univers serait capable de se créer lui-même. Tout comme un voyageur temporel pourrait, en principe, revenir dans son passé et devenir son propre père ou sa propre mère, l'univers pourrait faire une boucle pour revenir dans le temps et se donner vie seul en un Big Bang (sans l'aide d'une mystérieuse origine...) De cette manière, l'univers aurait, dans un sens, toujours existé, même si le temps lui-même reste fini dans le passé.

Cet ouvrage est loin de décrire toutes les possibilités de conception de machines à voyager dans le temps. La plupart des

propositions impliquent des sortes de « copier-coller » sur l'espace-temps, un peu comme si une gigantesque paire de ciseaux taillait des trous dans l'espace, les arrachait, tirant sur les bords exposés, puis les collaient ensemble selon le modèle... Bien que ces projets soient très artificiels, ils décrivent tous des espaces-temps possibles et servent de bancs d'essai à l'exploration des étonnantes conséquences physiques du voyage dans le temps.

INVERSER LE TEMPS

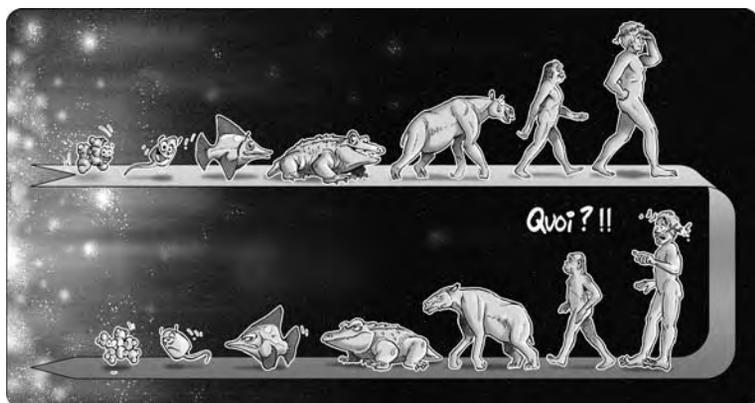
Le voyage dans le temps ne doit pas être confondu avec un sujet tout aussi fascinant (et spéculatif) : l'inversion du temps. Depuis l'époque de Platon au moins, philosophes et scientifiques ont songé à cette idée du temps « s'écoulant en arrière ». En réalité, l'expression est impropre. Le temps ne s'écoule nulle part. Aussi est-il plus précis de parler de systèmes physiques qui remonteraient le temps, comme un film que l'on fait revenir en arrière. Cela pourrait-il se produire ? L'eau pourrait-elle s'écouler en amont, et les morceaux d'un œuf cassé, se reconstituer en une coquille entière ?

Voyons cela ! Imaginez une boîte rigide contenant une douzaine de molécules de gaz qui se déplacent de manière chaotique et entrent en collision avec les autres, et les parois de la boîte. Supposez qu'à un certain moment, toutes les molécules soient réunies dans un même coin de la boîte. Cet arrangement ne tiendrait pas longtemps car les molécules en mouvement rebondiraient, puis se disperseraient dans l'espace disponible. La transition de « réunies » à « dispersées » fournit une frise du temps permettant de distinguer le passé du futur. À notre échelle, l'existence de telles transitions dans le monde donne l'impression

que le temps a une direction définie. L'inversion du temps occasionnerait alors des évènements comme la ruée des molécules de gaz dans le coin d'une boîte. Une telle chose est-elle crédible? Certainement. On s'attendrait à ce qu'après une durée suffisamment longue, une douzaine de molécules en mouvement au hasard finissent par se retrouver ensemble dans un angle de la boîte simplement par chance... En fait, il peut être prouvé mathématiquement que de telles répétitions doivent arriver à maintes reprises.

Maintenant, qu'une poignée de molécules « reviennent en arrière » est une chose, que l'univers entier fasse de même en est une autre! De plus, l'attente nécessaire pour que les choses reviennent à leur arrangement initial augmente rapidement avec chaque particule supplémentaire impliquée. Une chambre classique contient plus 10^{24} molécules d'air. Il leur faudrait bien plus de temps que celui écoulé depuis la création de l'univers pour se réunir dans un seul coin! Point positif: nous ne sommes pas prêt d'être asphyxiés dans une pièce pour cette raison. Mais au juste, qu'est-ce que tout cela signifie? Qu'en principe, le monde pourrait retourner à l'état dans lequel il était (en 1900 par exemple), mais qu'il est extrêmement improbable que cela se produise en l'espace d'une vie humaine... à moins qu'il n'y ait une conspiration cosmique programmée parmi les innombrables particules?

Selon certains physiciens, une telle conspiration pourrait être programmée dans les conditions initiales de l'univers, laquelle contraindrait finalement le cosmos entier à revisiter sa condition de départ dans le Big Bang. Dans ce cas, nous ne le saurions probablement pas. Si cette étrange inversion se produisait, elle différerait de manière fondamentale du voyage dans le temps tel qu'il est décrit dans ce livre. Renverser le



23 | Le temps pourrait-il s'inverser ?

temps implique de *re-créer* le passé, pas de le revisiter. Si l'univers devait faire machine arrière, alors l'activité du cerveau humain également. Nous ne verrions pas le grand film cosmique défiler à l'envers, les étoiles aspirant la lumière, les trous noirs vomissant des gaz... tout simplement, parce que nos esprits et nos sens seraient eux aussi dans un mécanisme d'inversion ! Par conséquent, vivre dans un univers dans lequel le temps « s'écoule en arrière » ne nous choquerait pas plus que de vivre dans celui que nous observons maintenant.

POURQUOI  TUДИER LE VOYAGE DANS LE TEMPS ?

Le sujet, se présentant à maintes reprises à la fois dans les romans classiques et de science-fiction, a fourni un terreau fertile d'idées aux écrivains du siècle dernier. Il a aussi provoqué un long débat (plutôt confus) parmi les philosophes à propos de la nature du temps et des contradictions logiques qui semblent apparaître

dès que le voyage dans le passé est évoqué. Le plus souvent pourtant, les chercheurs, eux, ont évité le sujet. Jusqu'à récemment... Aujourd'hui, la recherche sur le voyage dans le temps est passée à quelque chose de l'ordre de l'industrie artisanale dans la communauté de la physique théorique. Certains trouvent cela surprenant. Nous avons vu comment le sujet semblait encore fantaisiste, lui qui fait appel à des idées extrêmement spéculatives de trous de ver, d'ingénierie cosmique et de formes de matière exotique. Par conséquent, comment les scientifiques peuvent-ils justifier passer un temps précieux et dépenser des fonds de recherche sur un sujet aussi frivole?

Bien sûr, il ne faut pas nier son côté amusant, ni que certains scientifiques le traitent comme un jeu intellectuel. Mais il a aussi un côté sérieux. N'oubliez pas que l'expérience de pensée fait partie intégrante du processus scientifique! L'invention par le scientifique de tels scénarios (lesquels, sur l'instant, peuvent sembler farfelus) a pour but de tester les théories en cours au-delà de leurs limites. Pourquoi travailler ainsi? Pour soulever les défauts de logique ou les incohérences de la théorie... Ainsi, la réflexion a permis à Galilée de déduire la loi de chute des corps (tout cela par pur raisonnement)! Elle a aussi mené Einstein à prédire correctement l'effet de dilatation du temps. Dans les années 1930, les expériences de réflexion comme celles associées au célèbre paradoxe du chat de Schrödinger ont joué un rôle important dans l'éclaircissement de la signification de la mécanique quantique. De manière significative, les progrès technologiques permettent désormais à de nombreuses expériences de pensée d'être réalisées comme des expériences réelles.

Le simple fait que le voyage dans le temps semble improbable, voire impossible pour nous aujourd'hui, ne signifie pas que nous

pouvons nous permettre d'ignorer ses implications. Il se pourrait que des voies de construction de machines à explorer le temps plus faciles soient découvertes un jour, des voies qui ne nécessiteraient pas les ressources d'une supercivilisation... Pour le moment, la seule possibilité de visiter le passé ou d'y envoyer des signaux représente un sérieux challenge pour notre compréhension de la physique (sans même nous soucier de savoir si oui ou non le voyage dans le temps deviendra un jour réalité)! Les chercheurs s'accordent à dire que la moindre tentative de conception d'une telle machine générerait certainement des effets de vide quantique dramatiques, conséquences qui ne peuvent être complètement explorées sans une théorie de la gravitation quantique fiable. Puisque établir une telle théorie est l'une des priorités actuelles pour les physiciens théoriciens, l'étude des boucles temporelles et l'éclairage qu'elle offre sur la structure causale profonde de l'univers tombe – pour ainsi dire – à point nommé!

Une part de la fascination qui entoure l'exploration du temps concerne les paradoxes liés au voyage dans le passé. Le but de la science étant de fournir une image cohérente de la réalité, si une théorie scientifique produit des prédictions véritablement paradoxales (plutôt que seulement étranges ou allant contre l'intuition), celles-ci sont d'excellentes raisons pour la rejeter... Comme nous l'avons vu, le voyage temporel est « bourré » de paradoxes. Comment les traiter ? À ce sujet, les opinions divergent sensiblement. Peut-être que les boucles causales peuvent être conçues de manière auto-cohérente ? La réalité se compose peut-être d'univers multiples ? Ou peut-être encore nous faut-il revoir de près notre description de la nature ? D'un autre côté, il se peut aussi qu'il n'y ait aucune possibilité d'échapper à la nature paradoxale du voyage dans le temps et que nous soyons

obligés d'invoquer la conjecture de protection chronologique d'Hawking et de renoncer à toutes les théories qui permettent le voyage dans le passé...

Les tentatives de description quantique de la gravitation les plus récentes sont formulées dans le contexte plus large d'une théorie physique complètement unifiée. Dans celle-ci, toutes les particules et les forces de la nature, dans l'espace et le temps, sont amalgamées dans un plan mathématique commun. Théorie à la mode parmi ces « théories du tout » ? Celle des supercordes, dont la présentation la plus complète est connue sous le nom énigmatique de « théorie-M ».

Il est fascinant de supposer que la protection de la chronologie puisse être un principe global de la nature au même titre que la seconde loi de thermodynamique par exemple. Nous pourrions d'ailleurs dresser une liste de tabous cosmiques :

Pas de machines à remonter le temps !
Pas de machines à mouvement perpétuel !
Pas de singularités nues !
Etc.

Et l'utiliser comme un filtre à théories physiques. Toutes les théories qui ne respecteraient pas les tabous de la liste seraient alors rejetées... Voilà qui serait une excellente façon d'éliminer les thèses concurrentes ! Si la liste était assez longue, il pourrait même arriver que seule une « théorie du tout » passe au travers du filtre. Nous pourrions enfin répondre à la question scientifique suprême : « Pourquoi cet univers-là plutôt qu'un autre ? »