

POUR LA La sélection SCIENCE

Des livres scientifiques à la pointe de l'actualité



NOUVEAUTÉ

Le plus grand des hasards Surprises quantiques

Jean-François Dars et Anne Papillault

Comment pensent et à quoi rêvent les physiciens quantiques ? Soixante-cinq d'entre eux, couverts d'honneurs ou abordant leur thèse, racontent leurs hésitations, leurs angoisses, leurs efforts, leurs fatigues, leurs fureurs, leurs espoirs... Un témoignage précieux sur une science intrigante, accompagné de superbes photographies de ces chercheurs de l'extrême.

978-2-7011-5605-7 • 224 p. • 20,00 €



Les déchiffreurs Voyage en mathématiques

Jean-François Dars, Annick Lesne et Anne Papillault

Qui sont les mathématiciens ? Comment travaillent-ils ? Qu'est-ce que l'intuition ? Autant de réponses que de questions dans cet ouvrage, où une cinquantaine de chercheurs, professeurs mondialement reconnus, médailles Fields ou jeunes thésards, proposent leur vision des mathématiques. Une plongée dans l'intimité de la création mathématique.

978-2-7011-4737-6 • 208 p. • 20,00 €



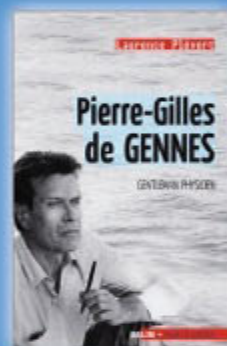
C. Ray et J.-C. Poizat

978-2-7011-4552-5 • 160 p. • 23,50 €



G. Pietryk

978-2-7011-3972-2 • 304 p. • 27,50 €



L. Piévert

978-2-7011-5228-8 • 368 p. • 23,00 €



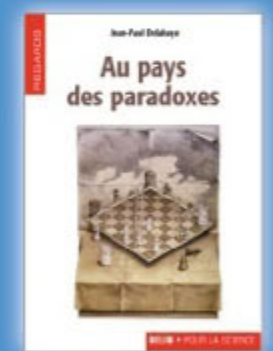
B. Valeur

978-2-7011-4751-2 • 160 p. • 23,90 €



J.-P. Delahaye

978-2-8424-1825-0 • 224 p. • 24,00 €



J.-P. Delahaye

978-2-8424-5090-8 • 192 p. • 24,00 €



D. Acheson

978-2-7011-4285-2 • 176 p. • 18,50 €



N. Gauvrit

978-2-7011-4622-5 • 240 p. • 25,00 €



Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr

Philippe Boulanger

Les paradoxes temporels

Ils résultent notamment de l'impossibilité de voyager dans le futur ou le passé, de l'irréversibilité du temps, et de sa division à l'infini.

Il est difficile de méditer sur le temps sans ressentir avec acuité les limites de notre intelligence, car le temps a ses caractéristiques évanescentes qui estompent notre compréhension. Nous ne mesurons pas ce que le temps est, mais ce qu'il fait devenir, comment notre environnement change « avec le temps ». Marie Bonaparte, arrière-petite nièce de l'empereur et l'une des premières psychanalystes françaises, exprimait cela dans un chiasme : « Ainsi, le temps me fait et je fais le temps. »

Longtemps les échelons du temps ont été astronomiques, la longueur du jour, du mois lunaire, d'une année. Aussi l'imagination concevait-elle difficilement des durées plus importantes. Il a fallu que l'on sache mesurer des désintégrations atomiques extrêmement lentes pour que l'on puisse évaluer des durées plus longues, des temps de l'ordre de l'ancienneté du monde. Notons qu'à mesure que l'on perfectionnait les mesures des temps longs, la Terre vieillissait : aujourd'hui les mesures convergent vers 4,55 milliards d'années. On peut penser que notre Terre ne vieillira plus beaucoup.

Le temps peut-il varier ? Comme nous mesurons les variations des choses par rapport au temps, avec quelles unités pour-

rions-nous mesurer les changements de l'écoulement du temps ? L'évolution du temps par rapport à lui-même suggère un écoulement invariable. Et si le temps variait, pourrions-nous le savoir ? Qu'advendrait-il si tout à coup une seconde durait le double ? Que remarquerions-nous ? Rien semble-t-il, selon les physiciens ! Notons que le doublement des longueurs, contrairement au doublement du temps, serait visible, car les aires seraient multipliées par quatre et les volumes (donc les masses) par huit : de nombreux monuments s'écrouleraient à cause de l'augmentation de la pression sur les structures. Et si le temps s'arrêtait et si l'Univers se figeait, le remarquerions-nous ? Non, car la mécanique quantique indique que notre seule observation ferait repartir le temps !

Les ouvrages de fiction ont rêvé que le temps pouvait changer pour certaines personnes comme la Belle au bois dormant ou Rip Van Winkle ; Dieu a arrêté le Soleil pour que Josué puisse battre les Amoréens.

Tout cela n'était que légendes et rêveries jusqu'à la relativité restreinte d'Einstein, il y a un siècle. Pour préserver le déroulement de la causalité, où la cause précède toujours l'effet, il fallait une vitesse limite et finie à tout phénomène (si la

vitesse était infinie, la cause coïnciderait avec l'effet et n'en pourrait se distinguer). La vitesse limite de propagation de la cause fut, à défaut de plus vraisemblable, la vitesse des particules de masse nulle, sans inertie : les photons. Mais alors on ne pouvait ajouter de vitesse à cette vitesse, et les rapports des longueurs et du temps devaient être modifiés en conséquence. Le temps s'écoulait plus lentement à l'approche de la vitesse de la lumière.

Ce qui introduisit le paradoxe des jumeaux, dit encore du voyageur de Langevin : un voyageur partant de la Terre et se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière vieillirait moins vite que son jumeau sédentaire et, à son retour sur Terre, retrouverait donc son frère beaucoup plus vieux que lui. Comme le jumeau sur Terre pourrait tenir le même raisonnement puisque, pour son jumeau voyageur, il se déplacerait à une vitesse proche de celle de la lumière, ils seraient, semblait-il, tous les deux plus jeunes que l'autre... Le paradoxe n'est que psychologique, car le jumeau qui a voyagé ne s'est pas déplacé à vitesse constante, de sorte que le calcul doit être modifié. Le jumeau qui aurait fait l'aller-retour en fusée serait vraiment plus jeune.



L'ESSENTIEL

- ✓ Le temps est source de paradoxes et de nombreux récits de science-fiction.
- ✓ Les voyages dans le temps permettent aux auteurs d'imaginer des situations impossibles.
- ✓ L'infini, la réversibilité, l'immortalité sont autant de questions qui donnent naissance à des paradoxes temporels.

© Shutterstock/Paul Fleet

Il n'empêche, le pas avait été franchi : l'écoulement du temps pouvait varier. Avec la théorie de la relativité générale, Einstein montra que la force de gravitation modifie aussi le temps et que vous vieillissez un peu plus vite au grenier qu'au sous-sol où la plus grande proximité (relative) du centre de la Terre augmente la force de gravitation et diminue la fréquence des battements de l'horloge mesurant le temps.

Changez le passé : le présent et le futur seront détruits

L'écoulement du temps, ralentit pour certains, équivaut ainsi à un voyage vers le futur chez les autres. Bien que les temps relativistes impliqués, par leur petitesse, n'aient pas l'attrait de *La Machine à explorer le temps* de H. G. Wells, ils n'en sont pas moins réels et le voyageur dont le temps s'écoule lentement peut voir le futur de l'autre. Imaginons qu'une prémonition, fondée sur une information venant d'un bref voyage vers l'avenir, nous permette de voir un événement horrible et de prendre des mesures pour contrer ce destin fatal : si l'avenir se révèle alors radieux sans la catastrophe

évitée, quel crédit accorder à la sombre intuition d'un sort contraire, puisque celui-ci n'aura finalement pas lieu ? « Si c'est vrai, c'est faux » : on reconnaît là une version prévisionnelle du paradoxe du menteur.

Les voyages vers le passé entraînent des paradoxes plus prenants que les voyages vers le futur. Supposons qu'enfourchant notre machine, nous voyagions vers le passé. Le premier paradoxe est que la machine pourrait être connue par les habitants du passé et cette connaissance serait ineffaçable : la machine ne pourrait plus être découverte ultérieurement. Il est facile d'en tirer un argument contre l'existence des voyages dans le passé : si leur technique était découverte dans le futur, elle serait appliquée et déjà connue dans les rivages du passé temporel explorés. Aussi les habitants du passé visité pourront construire leurs propres machines à remonter le temps... et ainsi de suite : nous devrions les avoir vus, nos ancêtres aussi.

Lors des randonnées dans le passé, celui-ci pourrait être modifié et les modifications du passé auraient des conséquences notables et inattendues. Le filon a été exploité par les auteurs de science-fiction, notamment René Barjavel dans

Le voyageur imprudent où le héros voulant tuer Bonaparte commence par tuer un garde, qui n'est autre que son grand-père. Comme son grand-père meurt avant d'avoir eu un fils, et donc un petit-fils, le héros ne peut avoir vécu et ne peut avoir voyagé dans le temps pour tuer son grand-père, lequel a pu avoir un petit-fils, etc. On ne peut échapper à cette boucle logique inextricable qu'en envisageant des bifurcations dans l'Univers, celui-ci se dédoublant dès le début du voyage dans le passé. Dans la bifurcation habituelle, le grand-père survit, dans une autre, il meurt et le héros n'existe plus. Quand vous changez le passé, vous détruisez le présent et le futur.

Un paradoxe alternatif du voyage « légal » vers le passé est la suppression du futur. S'il ne veut pas modifier le passé, un individu voyageant à rebours dans le temps devra retrouver sa vie d'autrefois et chausser les bottes qu'il portait quand il était plus jeune. Il revit alors la même vie jusqu'au moment où il a décidé le voyage vers le passé... qu'il accomplit ; ainsi il s'enferme dans une boucle sans fin et tout son environnement avec lui. Le voyage dans le passé interdirait ainsi tout futur, s'il n'y avait la pirouette, peu

L'AUTEUR



Philippe BOULANGER, ancien directeur de la rédaction de *Pour la Science*, a publié un livre consacré aux paradoxes.

✓ BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Kantor et L. Graham,
Au nom de l'infini,
Belin-Pour la Science,
coll. Regards, 2010.

J.-P. Delahaye,
Au pays des paradoxes,
Belin-Pour la Science,
coll. Regards, 2^e édition, 2010.

Ph. Boulanger et A. Cohen,
Le trésor des paradoxes,
Belin, 2007.

convaincante, car *ad hoc*, du dédoublement de l'Univers. Finalement, le meilleur argument contre les voyages dans le temps consiste à dire qu'il ne peut y avoir de contradictions dans le monde : comme les voyages dans le temps aboutissent à des contradictions, ils ne peuvent exister.

Ce raisonnement est renversé dans la théorie des trous de ver qui relie un trou noir (lequel absorbe toute matière) et un trou blanc (lequel expulse toute matière) ; un voyage vers le passé résulterait de ce passage. Pour éliminer les effets sur le passé, toute chose peut passer à travers le trou de ver avec la restriction que les conditions du passage lui interdisent de modifier le passé de façon qu'il ne puisse pas passer par le trou de ver... La boîte de Pandore est définitivement refermée par cet artifice : les voyages dans le temps sont permis, sauf ceux qui en interdisent l'existence.

Passionné par ce thème, l'écrivain scientifique américain Martin Gardner montra la nature intrinsèquement paradoxale d'un « téléphone tachyonique », où l'information serait véhiculée à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Supposons que deux personnes A et B se téléphonent par l'intermédiaire de ces tachyons : quand A reçoit un message de B, il répond immédiatement. B promet d'envoyer un message pour A à trois heures de son temps si – et seulement si – il n'a pas reçu un message de A avant deux heures. Mais les messages remontent le temps : si B envoie son mes-

sage à trois heures, la réponse de A pourrait lui parvenir avant deux heures, alors l'échange de messages n'aura lieu que s'il n'a pas lieu, et réciproquement : le téléphone est un « antitéléphone » où les réponses précèdent les questions ! De même, dans un téléviseur tachyonique, les films passeraient à l'envers. En toute rigueur, ces raisonnements ne prouvent pas formellement l'inexistence des tachyons, mais plaident contre leur utilisation comme supports de communication : « On ne peut pas envoyer de télégrammes dans le passé » avait résumé Albert Einstein.

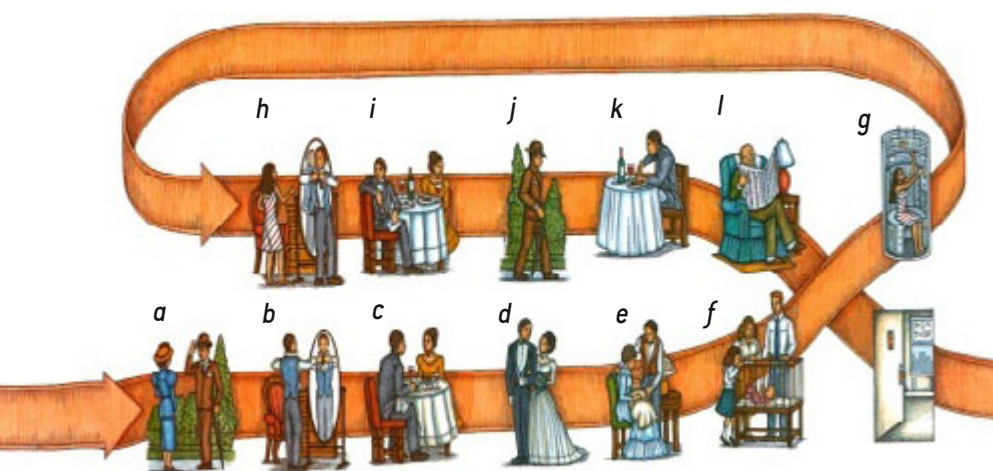
Achille et la tortue

Le logicien Bertrand Russell s'intéressa beaucoup au paradoxe d'Achille et de la tortue. Achille part après la tortue, mais, comme il court plus vite, il franchit la distance qui le séparait de la tortue au départ. Pendant ce temps, la tortue a parcouru une petite distance que le bouillant Achille s'empresse de franchir, et ainsi de suite. Ainsi chaque fois qu'Achille atteint l'endroit où la tortue se trouvait, elle a continué à avancer. La logique semble indiquer qu'Achille ne rattrape jamais la tortue, ce que l'expérience contredit évidemment. De surcroît, si Achille rattrapait la tortue, dans la suite infinie d'étapes « pensées », il y aurait un dernier terme où Achille atteindrait la tortue, ce qui est aussi paradoxal, une série infinie n'ayant pas de dernier terme.

Pour parcourir une distance, nous devons traverser une infinité de distances, ce qui semble impossible. Une solution serait d'affirmer qu'il existe une unité de temps indivisible, le chronon. Au-dessous de cet intervalle, un photon ne peut s'engager dans une quelconque interaction (la vitesse de la lumière étant grande, mais *finie*) : comment, en effet, parler de temps alors qu'il ne peut rien se passer ?

Si la distance entre Achille et la tortue n'est pas sécable à l'infini, il y a une dernière étape, quand Achille n'est distant de la tortue que d'un chronon fois sa vitesse. Dans un ultime effort, qui ne lui coûte presque rien, le roi des Myrmidons franchit d'un coup l'ultime étape et rattrape la tortue. Hélas pour cette explication à la Démocrite, il n'y a pas d'expérience physique qui impose l'existence d'un chronon...

Serait-il impossible de résumer une activité humaine à un ensemble de préceptes logiques ? Nous ne pouvons évi-



1. LES VOYAGES DANS LE TEMPS pourraient interdire au futur de se dérouler comme il le devrait. Supposons la rencontre de deux jeunes gens [a]. Ils se plaisent, se marient et ont une fille [b à e]. Cette dernière a elle-même une fille [f] qui entreprend un voyage dans le temps [g]. Elle rencontre son grand-père [h], mais ils ne se plaisent pas [i]. Le grand-père reste célibataire et n'a pas d'enfants ni de petits-enfants [j à l]. Ce dénouement est paradoxal, puisque le grand-père a eu une petite-fille. Il l'aurait été tout autant si le grand-père avait épousé sa petite-fille !

demment accepter cette impossibilité. Nous pouvons seulement nous inquiéter sur le nombre de raisonnements erronés et apparemment logiques, analogues au paradoxe d'Achille, qui sont disséminés dans la littérature.

L'immortalité est difficilement testable, car il faudrait un temps infini pour la confirmer. Ainsi l'immortalité de la lignée de l'homme ne peut être qu'invalidée : si la lignée est mortelle nous le saurons, mais pas si elle est immortelle. De même, il faudrait un temps infini pour tester l'absolu pouvoir d'une fontaine de jouvence. Ce qui peut tromper un optimiste mesuré, d'où ce distique d'un humoriste :

« S'il était un pays où l'on vive toujours, J'irais tranquillement pour y finir mes jours. »

Zénon d'Élée inventa un avatar du paradoxe d'Achille montrant que tout mouvement était impossible : une flèche pour atteindre son but doit parcourir la moitié de la distance qui l'en sépare, puis la moitié de la moitié, puis... Une infinité de distances doivent être parcourues en un temps fini.

Ce paradoxe illustre ce que le philosophe James Thomson désigne par une supertâche. Il a inventé un exemple frappant : imaginons avec lui qu'une lampe reste allumée une minute, éteinte une demi-minute, rallumée un quart de minute, et ainsi de suite indéfiniment. La série $(1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + \dots)$ converge vers deux minutes. Les allumages ont une fin et l'on s'attend donc à ce que la lampe soit allumée ou éteinte, après ce cycle d'allumages et d'extinctions successifs. Mais l'état de la lampe est indécidable, car il est impossible de préciser si l'interrupteur se trouve ou non enclenché au terme d'un nombre infini de poussées, vu qu'il n'existe pas de dernière poussée !

Certains philosophes, en particulier Paul Benacerraf, affirment que l'apparente contradiction résulte d'une information insuffisante, tout comme le texte de la pièce de Molière, *Le malade imaginaire*, ne nous informe pas si Molière est gaucher ou droitier.

Il serait avantageux d'utiliser une machine à la Thomson pour calculer les décimales de π . En une seconde, nous déterminerions la première décimale de π , en une demi-seconde, la deuxième et ainsi de suite. En deux secondes, nous aurions calculé l'infinité des décimales...

Il existe bien des exemples de tâches infinies. Citons-en deux autres.

Dans la triste histoire de Tristram Shandy, celui-ci consacre une année à écrire l'histoire de la première journée de sa vie ; une autre année à écrire celle de la deuxième journée et ainsi de suite... Si Shandy est mortel, le travail restera évidemment inachevé. S'il est immortel, Shandy a un temps infini et aucune partie de sa vie ne restera à l'état de projet, car, à chaque jour, correspond une année d'écriture, mais le retard s'accumulera indéfiniment.

Le paradoxe du mathématicien John Edensor Littlewood (1885-1977) est plus agressif : nous avons une urne, pouvant contenir une infinité de billes, où nous plaçons, au temps zéro, 10 billes numérotées de 1 à 10 et nous prélevons la bille 1. Après une demi-seconde, nous répétons la même opération, nous ajoutons les billes numérotées de 11 à 20 et prélevons la bille numérotée 2 et ainsi de suite pour tous les temps de la série $1, 1/2, 1/4, 1/8, \dots$. Combien restera-t-il de billes dans l'urne après deux secondes ? Selon un raisonnement, il y en aura une infinité, car nous aurons ajouté neuf billes une infinité de fois. Selon un autre mode de pensée, il ne reste plus aucune bille, car toute bille numérotée n disparaît à l'instant $t = 1 - 1/2^{n-1}$.

L'impossible réversibilité

Quand Boltzmann énonça que l'entropie d'un système isolé croissait avec le temps de façon irréversible, son collègue Loschmidt formula le paradoxe qui allait porter son nom : « Les équations qui gouvernent les évolutions des particules d'un système mécanique sont symétriques par rapport au temps. Comment peut-on prétendre qu'elles conduisent à des lois irréversibles ? Tout système qui a évolué de l'ordre vers le désordre doit pouvoir être réordonné simplement en renversant la quantité de mouvement de chaque particule, sans rien changer à l'énergie du système. » Boltzmann répondit qu'il était bien difficile de renverser toutes les quantités de mouvement en même temps. Des expériences actuelles ont réalisé ce fait d'armes, mais dans des conditions assez peu naturelles...

La réponse physique classique au paradoxe de Loschmidt s'appuie sur le caractère très improbable des réactions en théorie réversibles. Quand on mélange du lait et du café, il ne faut plus compter sur leur séparation soudaine ; quand un objet fragile se brise, il n'a guère de chance de



2. SELON LE PARADOXE DES JUMEAUX, si un frère voyageait dans l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière, il vieillirait moins vite que son jumeau resté sur Terre.

se reformer par réunion spontanée de ses morceaux ; et les cendres ne reconstituent pas les arbres brûlés : l'asymétrie statistique de ces réactions induirait celle de l'écoulement du temps.

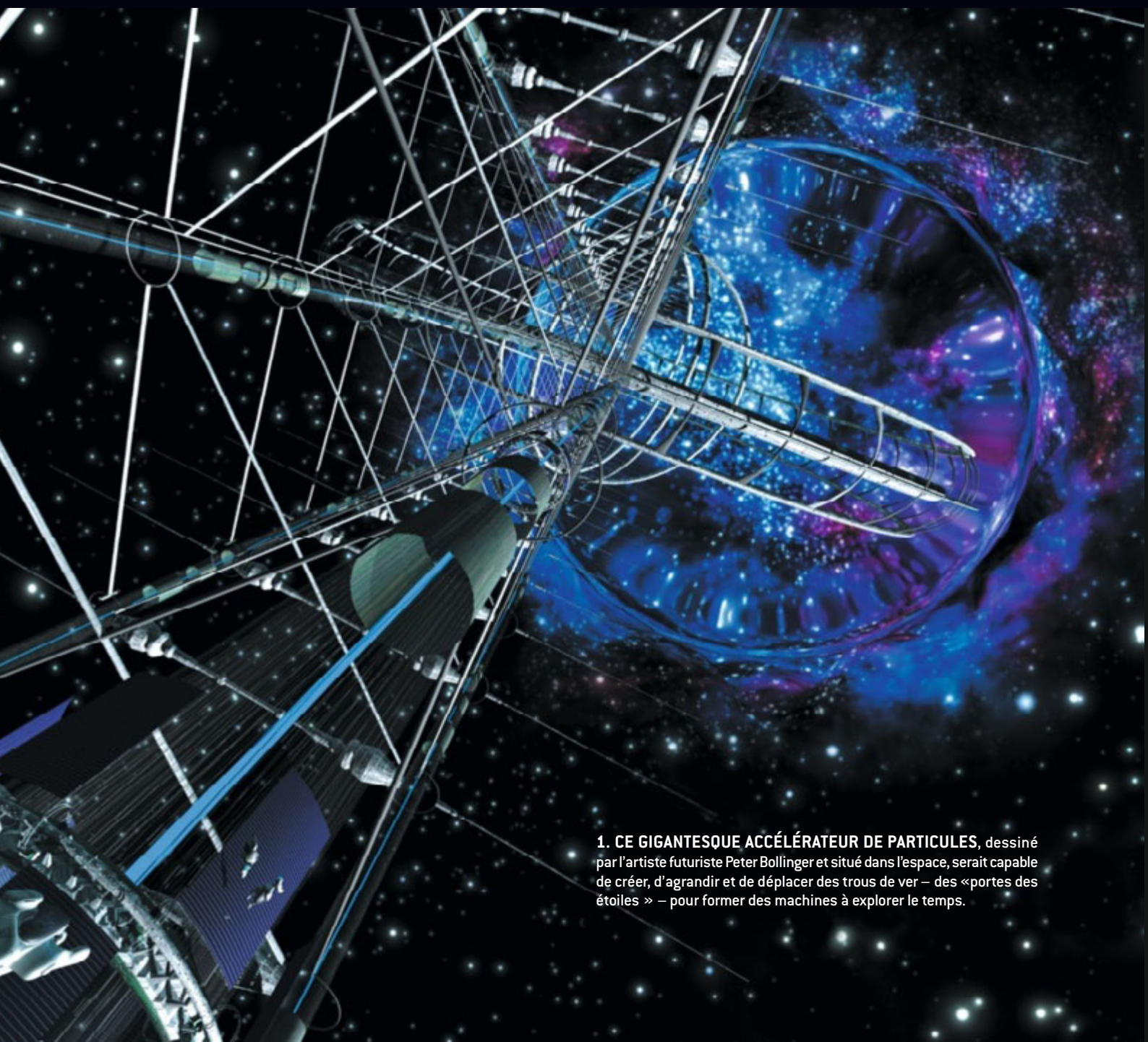
Poincaré a montré que tout système revient à un état proche de son état initial, mais le temps d'attente, jamais infini, peut dépasser l'âge de l'Univers... La réversibilité n'est pas constatée, car elle demande des temps de récurrence trop longs : si nous voulions voir le café au lait se séparer, il faudrait une patience... infinie. L'écrivain argentin Jorge Luis Borges l'avait déjà dit : « Les immortels ont tout le temps nécessaire pour accomplir le travail qu'il leur faut faire, aussi ne font-ils rien. » Nous ne sommes pas immortels, c'est pourquoi nous nous passionnons pour l'immortalité, les infinis de l'Univers, du temps et de ses paradoxes.

Notre sensation du temps est de l'ordre du « bon sens », ce qui, nous le savons, n'est pas satisfaisant en science, d'où les paradoxes. L'humanité a tout le temps pour résoudre les paradoxes du temps : il a fallu 300 ans pour que le paradoxe énoncé par Galilée (il y a deux fois plus de nombres entiers que de nombres pairs, mais comment un ensemble infini peut-il inclure un autre ensemble infini ?) soit expliqué par Cantor et que celui-ci ordonne les paradoxes des infinis. Soyons studieux et patients : le temps travaille pour nous. ■

Physique théorique

Peut-on créer une machine à remonter le temps ?

Paul Davies



1. CE GIGANTESQUE ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES, dessiné par l'artiste futuriste Peter Bollinger et situé dans l'espace, serait capable de créer, d'agrandir et de déplacer des trous de ver – des « portes des étoiles » – pour former des machines à explorer le temps.

Depuis que l'auteur britannique Herbert George Wells a écrit son célèbre roman *La Machine à explorer le temps* en 1895, le voyage dans le temps est un thème de science-fiction très populaire. Mais est-il vraiment possible ? Peut-on construire une machine qui transporterait un être humain dans le passé ou le futur ?

Pendant des décennies, le voyage dans le temps était hors de portée de la science. Cependant, ces dernières années, le sujet est devenu une activité ludique des physiciens théoriciens : ils s'y livrent notamment par jeu, car il est amusant de réfléchir au voyage dans le temps. Mais ce travail

l'autre. Dans la vie quotidienne, on ne remarque pas ces distorsions du temps, car elles deviennent importantes seulement quand le mouvement se fait à une vitesse proche de celle de la lumière. Même à la vitesse des avions, la dilatation temporelle pendant un voyage classique se limite à quelques nanosecondes ! Néanmoins, les horloges atomiques sont assez précises pour enregistrer le décalage et confirmer que le temps s'étire vraiment sous l'effet du mouvement. Ainsi, le voyage dans le futur est une réalité avérée, même si pour l'instant, cela n'a jamais été très impressionnant (voir la figure 2)...

Si l'on arrivait à fabriquer une sorte de « porte des étoiles », on voyagerait dans le temps.

Les nouveaux accélérateurs de particules en seraient presque capables, à l'échelle subatomique.

reste tout de même sérieux : comprendre la relation entre la cause et l'effet est une composante clef des tentatives de construction d'une théorie unifiée de la physique. Si le voyage dans le temps, sans aucune limitation, était possible, même en principe, la nature d'une théorie unifiée serait remise en cause.

Avant les théories de la relativité d'Albert Einstein, on pensait souvent que le temps était absolu et universel, c'est-à-dire le même pour tous quelles que soient les circonstances. Dans sa théorie de la relativité restreinte, Einstein propose que l'intervalle mesuré entre deux événements dépende de la façon dont l'observateur évolue. Ainsi, deux observateurs dont les vitesses diffèrent ne ressentent pas les mêmes durées entre deux événements.

On décrit en général cet effet avec le paradoxe des jumeaux. Supposez que Sam et Sally soient jumeaux. Sally embarque dans une fusée et voyage à très grande vitesse jusqu'à une étoile proche, fait demi-tour et revient sur Terre, tandis que Sam reste à la maison. Pour Sally, le voyage a duré un an. Mais quand elle revient, son frère a neuf ans de plus qu'elle. Sally et Sam n'ont plus le même âge, bien qu'ils soient nés le même jour : en fait, Sally a fait un bond de neuf années dans le futur de la Terre.

Cet effet, nommé dilatation des durées, se produit quand deux observateurs se déplacent l'un par rapport à

Pour observer des failles temporelles, il faut sortir du domaine de l'expérience ordinaire. Les particules subatomiques peuvent être propulsées à des vitesses proches de celle de la lumière dans les grands accélérateurs. Certaines de ces particules, tels les muons, ont une horloge intégrée, car elles se désintègrent avec une demi-vie connue ; en accord avec la théorie d'Einstein, on observe que la désintégration des muons est ralentie dans les accélérateurs.

Tordre l'espace-temps

En outre, certains rayons cosmiques subissent des distorsions temporelles spectaculaires. Ces particules se déplacent à une vitesse si proche de celle de la lumière que, de leur point de vue, elles traversent la galaxie en quelques minutes, même si dans le référentiel terrestre, elles semblent mettre plusieurs dizaines de milliers d'années. S'il n'y avait pas de dilatation du temps, certaines de ces particules (celles qui sont instables) n'arriveraient jamais sur Terre, car elles se désintégreraient bien avant.

La vitesse est une façon de faire un bond en avant dans le temps. La gravité en est une autre. Dans sa théorie de la relativité générale, Einstein prédit que la gravité ralentit le temps. Les pendules avancent plus vite dans l'espace qu'au sol. Cet effet est à nouveau minuscule, mais il a été mesuré directement grâce à des horloges

L'ESSENTIEL

✓ Voyager vers le futur est conceptuellement assez simple. Si l'on s'approche de la vitesse de la lumière ou si l'on se trouve dans un fort champ gravitationnel, on ressent le temps plus lentement qu'autrui : autrement dit, on voyage dans son futur.

✓ Mais remonter dans le passé est plus difficile. La théorie de la relativité permet dans certaines configurations de l'espace-temps, tel le trou de ver, c'est-à-dire un tunnel à travers l'espace et le temps – une « porte des étoiles ».

✓ Voyager dans le passé soulève quelques paradoxes causaux ; il serait pourtant possible de prendre part au passé.

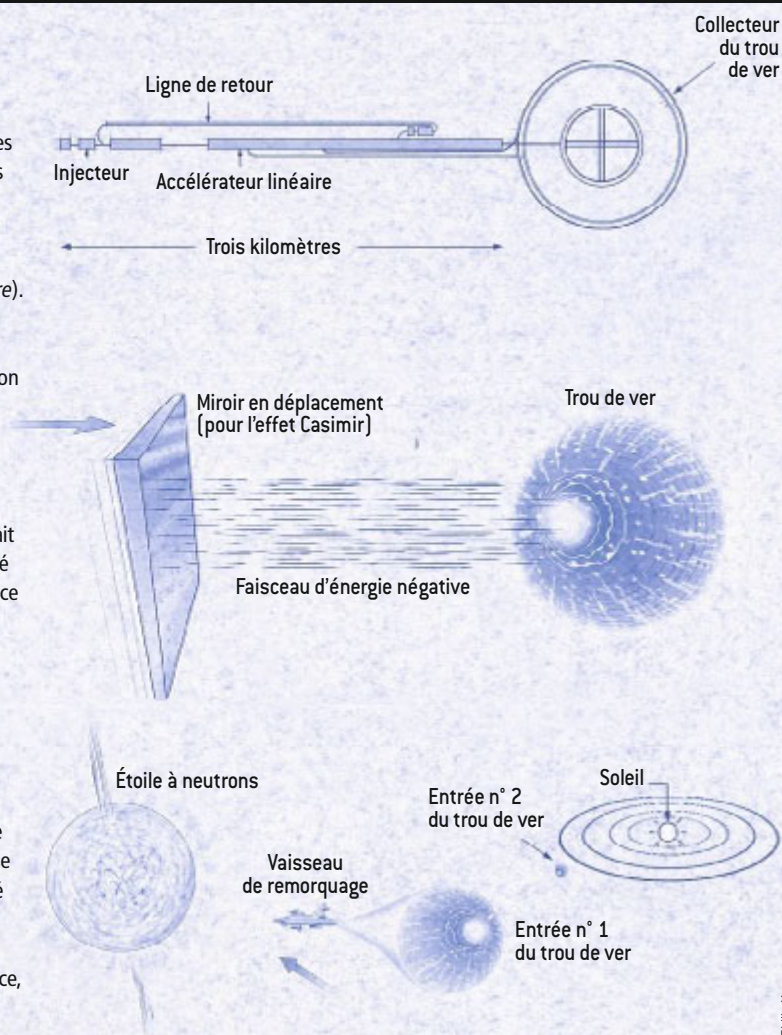
Peter Dilling

VOYAGER AVEC LES TROUS DE VER EN TROIS ÉTAPES

1 TROUVER OÙ FABRIQUER UN TROU DE VER, c'est-à-dire un tunnel reliant deux endroits de l'espace. Il pourrait exister de gros trous de ver dans l'espace profond, qui seraient des reliques du Big Bang. Sinon, on pourrait se contenter de trous de ver de taille subatomique, soit naturels (dont on pense qu'ils apparaîtraient dans l'espace pour disparaître aussitôt), soit artificiels (produits par des accélérateurs de particules, voir le dessin ci-contre). Ces petits trous de ver devraient alors être agrandis pour devenir utilisables, peut-être avec des champs d'énergie semblables à ceux qui ont entraîné l'inflation de l'Univers après le Big Bang.

2 STABILISER LE TROU DE VER. L'énergie négative, produite par exemple par effet Casimir – dû aux fluctuations quantiques du vide –, permettrait à un signal ou à un objet de traverser en toute sécurité le trou de ver. L'énergie négative s'oppose à la tendance du trou de ver à rétrécir en un point de densité infinie ou quasi infinie. En d'autres termes, elle empêche que le trou de ver ne se transforme en un trou noir.

3 REMORQUER LE TROU DE VER. Un vaisseau spatial séparerait les entrées du trou de ver. Une des entrées serait située près de la surface d'une étoile à neutrons, une étoile extrêmement dense dotée d'un fort champ gravitationnel. Une telle gravité ralentit le temps. Puisque le temps s'écoule plus rapidement à l'autre entrée du trou de ver, les deux entrées seraient séparées non seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps.



Philip Howe

ultraprécises (voir l'article de Christophe Salomon). D'ailleurs, on a pris en compte ce phénomène de distorsion du temps dans le système de géolocalisation GPS. Sans cela, les marins et les conducteurs de taxis par exemple se dirigeraient à des kilomètres de leur destination...

À la surface d'une étoile à neutrons – un astre composé surtout de neutrons et issu de l'effondrement gravitationnel du cœur d'une étoile massive –, la gravité est si forte que le temps est ralenti d'environ 30 pour cent par rapport au temps terrestre. Vus d'une telle étoile, les événements sur Terre ressembleraient à une vidéo légèrement accélérée. Le trou noir – un objet massif dont le champ gravitationnel est si intense qu'il empêche toute forme de matière ou de rayonnement de s'en échapper – représente le summum de la distorsion du temps ; proche de sa surface, le temps est presque figé par

rapport à celui de la Terre. L'intérieur du trou noir est au-delà de la fin des temps, pour l'univers extérieur au trou noir. Si un astronaute pouvait passer très vite près d'un trou noir et revenir sain et sauf (ce qui n'est guère plausible !), il ferait un grand saut dans le futur.

Retour dans le passé

Le voyage dans le futur semble donc possible. Qu'en est-il du retour en arrière ? Il est bien plus problématique. En 1948, Kurt Gödel, de l'Institut d'études avancées de Princeton, dans le New Jersey, a obtenu une solution aux équations du champ gravitationnel d'Einstein, qui décrivait un univers en rotation. Dans cet univers, un astronaute pourrait voyager dans l'espace pour atteindre son passé. Cela découle de la façon dont la gravité modifie la lumière. La rotation de l'univers

entraînerait la lumière (et par conséquent les relations causales entre objets), permettant à un objet de voyager en une boucle fermée dans l'espace qui soit aussi une boucle fermée dans le temps, sans dépasser la vitesse de la lumière dans le voisinage immédiat de la particule.

Bien qu'aucune observation ne montre que l'Univers dans son ensemble soit en rotation, la solution de Gödel prouve que le retour dans le passé n'est pas interdit par la théorie de la relativité. Et Einstein lui-même admit l'idée que sa théorie permettrait le voyage dans le passé dans certaines circonstances.

Puis on a trouvé d'autres scénarios permettant le voyage dans le passé. Par exemple, en 1974, Frank Tipler, de l'Université Tulane en Louisiane, a calculé qu'un cylindre massif infiniment long tournant sur son axe à une vitesse proche de celle de la lumière permettrait aux astronautes

de visiter leur passé, là encore en entraînant la lumière autour du cylindre en une boucle. En 1991, Richard Gott, de l'Université de Princeton, a prédit que les cordes cosmiques – des structures dont les cosmologistes pensent que certaines auraient pu être créées aux premiers stades du Big Bang – produiraient des résultats similaires. Mais c'est au milieu des années 1980 que le scénario le plus réaliste de machine à remonter le temps a émergé : il est fondé sur le concept de trou de ver.

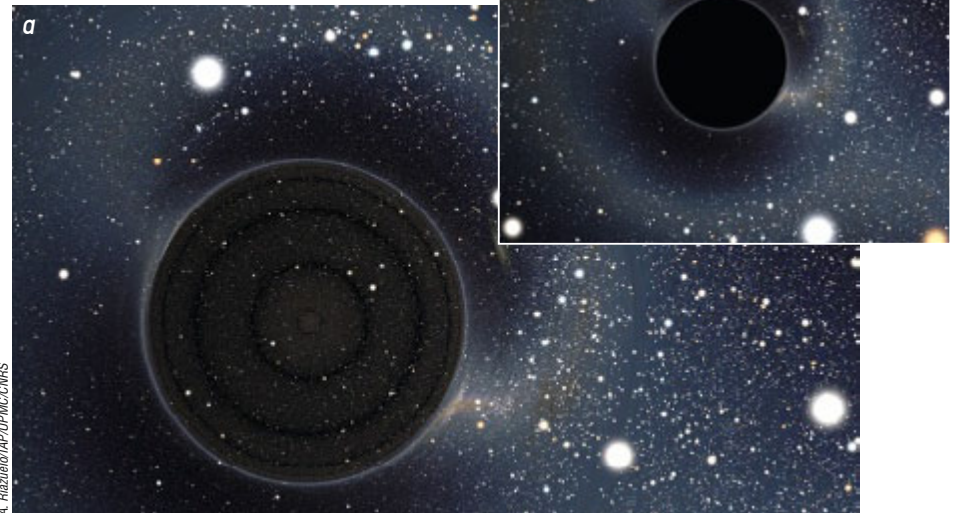
La « porte des étoiles »

En science-fiction, les trous de ver sont nommés « portes des étoiles » ; ils forment un raccourci entre deux points de l'espace-temps très éloignés. En sautant dans un hypothétique trou de ver, on ressortirait quelques instants plus tard à l'autre bout de la galaxie. Les trous de ver s'insèrent dans la théorie de la relativité générale, selon laquelle la gravité ne courbe pas seulement le temps, mais aussi l'espace. La théorie suggère que deux points de l'espace peuvent être reliés par des itinéraires alternatifs semblables à des routes et des tunnels. De même qu'un tunnel passant à travers une colline peut être plus court qu'une route construite à sa surface, un trou de ver peut être plus court que l'itinéraire classique dans l'espace ordinaire. Beaucoup plus court même.

En 1985, l'astronome américain Carl Sagan utilise le trou de ver comme dispositif de fiction dans son roman *Contact*. Inspirés par ce scénario, Kip Thorne et ses collègues, de l'Institut de technologie de Californie, ont entrepris de déterminer si les trous de vers étaient compatibles avec les lois de la physique. Leur point de départ était qu'un trou de ver ressemblerait à un trou noir en cela que ce serait un objet ayant une énorme gravité. Mais contrairement au trou noir, qui offre un aller simple vers nulle part, un trou de ver disposerait d'une entrée et d'une sortie.

Pour que le trou de ver soit traversable, il doit contenir ce que K. Thorne appelle de la matière exotique, laquelle s'oppose à la tendance naturelle qu'a un système massif d'imploser en un trou noir sous l'effet de son poids. L'antigravité, ou répulsion gravitationnelle, pourrait être produite par une hypothétique énergie ou pression négatives.

Or certains pensent que les états d'énergie négative existent dans certains systèmes



2. UN TROU DE VER (a) expulse la matière qu'il a pu engloutir, à cause de la présence de masse ou d'énergie négatives en son sein. Même un rayon lumineux capturé par un trou de ver en ressort. Pour cette raison, la silhouette d'un trou de ver – contrairement à celle d'un trou noir (b) – n'est pas totalement sombre. Elle révèle la région de l'Univers d'où sont issus les rayons lumineux qui l'ont traversée. Cette région apparaît cependant distordue du fait du champ gravitationnel extrêmement intense qui règne dans un tel objet.

quantiques, ce qui suggère que la matière exotique de K. Thorne n'est pas exclue par les lois de la physique. Toutefois, il n'est pas certain que l'on puisse rassembler suffisamment de matière antigravitationnelle pour stabiliser un trou de ver.

C'est alors que K. Thorne et ses collègues ont compris que si un trou de ver stable était créé, il pourrait être transformé facilement en machine à remonter le temps. Un astronaute qui en traverserait un ressortirait non seulement ailleurs dans l'Univers, mais aussi à un autre moment, dans le futur ou dans le passé.

Pour adapter le trou de ver au voyage dans le temps, une de ses entrées serait placée près de la surface d'une étoile à neutrons. La gravité de l'étoile ralentirait le

temps près de cette entrée, si bien qu'une différence de temps s'accumulerait progressivement entre les extrémités du trou de ver. Si celles-ci étaient installées dans des endroits adéquats de l'Univers, cette différence de temps serait fixée (*voir l'encadré page ci-contre*).

Supposez que la différence soit de dix ans. Un astronaute passant au travers du trou de ver dans une direction ferait un saut de dix années dans le futur, tandis qu'un astronaute passant dans l'autre sens sauterait dix ans en arrière. En retournant à son point de départ à grande vitesse dans l'espace ordinaire, le deuxième astronaute rentrerait à la maison avant même d'être parti. En d'autres termes, une boucle fermée dans l'espace deviendrait une boucle fermée du

VÉHICULE	CARACTÉRISTIQUES	DÉCALAGE TEMPOREL CUMULÉ
Avion de ligne	920 kilomètres par heure pendant huit heures	10 nanosecondes (par rapport au référentiel lié au sol)
Sous-marin nucléaire	300 mètres de profondeur pendant six mois	500 nanosecondes (par rapport au niveau de la mer)
Étoile à neutrons	Décalage vers le rouge	Les intervalles de temps augmentent de 30 pour cent (par rapport à la Terre)
Neutron de rayon cosmique	10^{18} électronvolts	Durée de vie moyenne rallongée de 15 minutes à 30 000 ans

3. IL EST AUJOURD'HUI POSSIBLE DE VOYAGER DANS LE FUTUR : en voici quelques exemples ! Dans la vie quotidienne, on ne remarque pas les distorsions du temps – qui se produisent quand deux observateurs se déplacent l'un par rapport à l'autre –, car elles deviennent importantes seulement quand le mouvement se fait à une vitesse proche de celle de la lumière.



Paul DAVIES est physicien théoricien au Centre australien d'astrobiologie de l'Université Macquarie, à Sydney.

temps. La seule limitation est que l'astronave ne pourrait pas revenir à une époque antérieure à la construction du trou de ver.

Mais un problème empêche la construction d'une machine à voyager dans le temps : la création du trou de ver. De telles structures se fauillent peut-être déjà dans l'espace, en tant que reliques du Big Bang. En outre, les trous de ver pourraient naturellement apparaître à des échelles minuscules, de l'ordre de la longueur de Planck, c'est-à-dire 20 ordres de grandeur plus petits qu'un noyau atomique. En principe, un trou de ver si minuscule pourrait être stabilisé par une impulsion d'énergie, puis d'une façon ou d'une autre dilaté jusqu'à atteindre des dimensions utilisables.

Paradoxes temporels

Si tous les problèmes techniques étaient surmontés, la production d'une machine à voyager dans le temps ouvrirait la boîte de Pandore des paradoxes causaux. Par exemple, imaginez qu'un voyageur tem-

porel visite le passé et tue sa mère encore enfant. Cela a-t-il un sens ? Si la fille meurt, elle ne peut pas devenir la mère du voyageur. Et si le voyageur n'est jamais né, il n'a pas pu retourner dans le passé et assassiner sa mère...

Les paradoxes de ce type surgissent quand le voyageur essaie de modifier le passé, ce qui est impossible, car si le passé change, l'existence même du voyageur est compromise : il ne peut donc pas avoir fait ce voyage. À moins d'imaginer que quelqu'un prenne part au passé pour assurer que le passé se déroule comme il l'a réellement fait (voir l'encadré page ci-contre). Ainsi, la boucle causale reste cohérente et ne présente plus de paradoxe. La cohérence causale imposerait des limitations sur ce que le voyageur peut faire, mais elle n'interdit pas pour autant le voyage dans le temps.

Le retour dans le passé, s'il n'est pas paradoxal, n'en reste pas moins bizarre. Considérez le voyageur temporel qui saute d'un an en avant et lit un article sur un nouveau théorème mathématique. Il en

LE VOYAGE VERS LE FUTUR EST-IL VRAIMENT POSSIBLE ?

Sans cesse, nous voyageons vers le futur. C'est ce que nous nommons « l'écoulement du temps ». Mieux vaudrait dire que « nous nous écoupons dans le temps ». Le tragique de nos existences vient de l'absence de tout contrôle sur ce voyage temporel permanent vers le futur.

Mais les lois qui régissent ce voyage ne sont pas conformes à l'intuition, comme la théorie de la relativité l'exprime : la notion intuitive de durée séparant deux événements n'existe pas. Chaque « observateur » peut définir pour lui une durée propre, mais les durées propres des uns et des autres n'ont rien à voir, tout comme les durées de leur voyage vers le futur, qui ne se correspondent pas. Alors comment définir le « voyage vers le futur » ?

Soit il existe une notion que l'on peut qualifier de « temps » (c'est le cas en physique newtonienne), et le voyage temporel est impossible. Soit le temps n'existe pas (je veux dire par là un temps absolu) et l'on peut envisager des processus que l'on nommerait voyages vers le futur. C'est le cas en relativité générale qui autorise des « boucles de temps fermées ».

Imaginons une particule élémentaire qui décrit une telle boucle de temps fermée. Et considérons un événement A qui la concerne. Cet événement se situe à la fois dans son futur et son passé. À partir de cet événement A, le temps propre de la particule « s'écoule » vers ce qui représente pour elle son futur. Après une certaine durée de ce temps propre T (égale à

la « longueur » de la boucle fermée dans l'espace-temps), la particule « vit » l'événement A. On aurait envie de dire « revit ». Mais en fait, l'événement n'est vécu qu'une seule fois, et donc de façon unique. On peut dire qu'une durée T du temps propre de la particule s'est écoulée entre l'événement A et... l'événement A. Tandis que pour moi (par exemple), aucune durée de mon temps propre ne s'est écoulée entre cet événement et lui-même.

Une telle situation est *a priori* possible selon la relativité générale. Qu'elle puisse se réaliser dans la pratique reste une question débattue. Une telle situation n'engendre pas de paradoxe. L'événement A (comme chaque autre événement de la boucle de temps fermée) n'est vécu qu'une seule fois. Même si l'on a l'impression que la particule « vit » l'événement A plusieurs fois, elle se retrouve « à chaque passage » dans la même situation. En particulier, elle ne conserve aucune mémoire de son passé (ni de son futur), car une particule reste de toute façon identique à elle-même.

Ainsi, du point de vue d'une particule élémentaire, l'écoulement de son temps propre n'a guère de pertinence. Il est déjà acquis que le « temps » a disparu (voir l'article de M. Lachièze-Rey). Mais cela suggère que même la notion de « temps propre » est superflue et qu'une théorie plus complète pourrait s'en passer. En d'autres termes, une particule (isolée) ne dispose d'aucune horloge qui lui permet-

trait de suivre l'écoulement de son temps propre (si c'était le cas, elle constituerait avec cette horloge un système composite, ce qui correspond au cas ci-après).

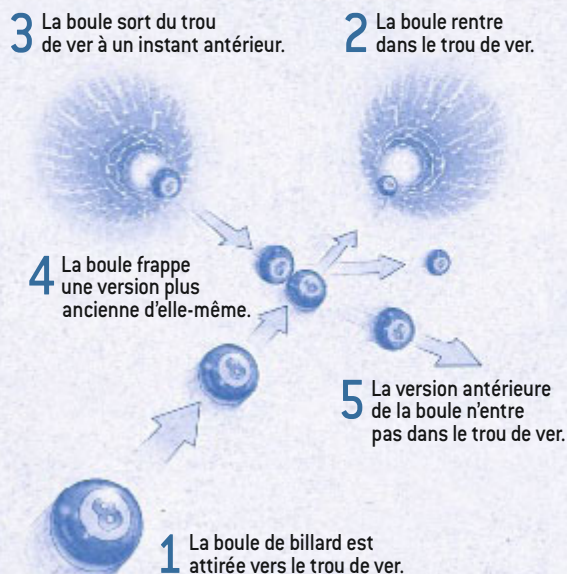
Mais peut-on imaginer qu'un système plus complexe, voire un observateur (un cosmonaute), suive une boucle de temps fermée et appartienne à son propre futur ou passé ? Les choses se compliquent. Pour que le cosmonaute décrive une boucle de temps fermée, chacune des milliards de milliards de particules qui le compose devrait suivre cette boucle, et elles devraient conserver la cohésion qui fait qu'elles forment un cosmonaute. Or nous avons toutes raisons de penser que cela est impossible. Déjà, au voisinage d'un trou noir de dimensions convenables (par exemple fabriqué par l'homme), situation pourtant bien moins « extrême », un cosmonaute serait dissocié par des forces de marée.

Ainsi, un système complexe, tel un cosmonaute, ne peut pas décrire une boucle de temps fermée. Or tous les paradoxes évoqués à propos des voyages dans le temps reposent sur le fait qu'un cosmonaute a une mémoire (voire une intentionnalité). Vraisemblablement, cette mémoire ne serait pas préservée dans un voyage temporel (tant pis pour les auteurs de science-fiction).

Marc Lachièze-Rey,
Astroparticule et cosmologie (UMR 7164),
Université Paris 7-Denis Diderot

MODIFIER LE PASSÉ EST SOURCE DE PARADOXES TEMPORELS

LE « PARADOXE ULTIME » apparaît quand des personnes ou des objets peuvent remonter le temps et modifier le passé. Une version simplifiée met en jeu des boules de billard. Une boule de billard passe dans un trou de ver faisant office de machine à remonter le temps. En émergeant, elle frappe la version antérieure d'elle-même, ce qui l'empêche de rentrer dans le trou de ver.



LA RÉOLUTION DE CE PARADOXE repose sur un fait simple : la boule de billard doit respecter la logique et les lois de la physique. Elle ne peut pas traverser le trou de ver d'une façon qui l'empêchera de le traverser (à nouveau). Mais elle peut le faire d'une infinité d'autres façons.



Philip Hove

note les détails, revient à son année de départ et enseigne le théorème à un étudiant, qui le rédige alors. L'article est, évidemment, celui-là même que le voyageur a lu. Une question se pose alors : d'où est venue l'idée du théorème ? Pas du voyageur temporel, puisqu'il a lu le théorème, mais pas non plus de l'étudiant, qui l'a appris du voyageur temporel. L'idée aurait surgi de nulle part, sans raison.

Protéger la chronologie

Ces conséquences insolites du voyage dans le temps ont conduit certains scientifiques à en rejeter la notion. Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, a proposé une « conjecture de protection de la chronologie », qui interdirait les boucles causales... et les voyages dans le temps. Comme la théorie de la relativité autorise les boucles causales, la protection de la chronologie nécessiterait l'intervention d'un autre facteur pour empêcher le retour dans le passé. Quel serait ce facteur ?

Les processus quantiques pourraient offrir une solution. L'existence d'une machine à voyager dans le temps permettrait aux particules de revenir par boucle

dans leur passé. Les calculs suggèrent que les perturbations qui suivraient s'auto-renforceraient, créant une vague d'énergie incontrôlable détruisant le trou de ver.

La protection de la chronologie n'est pour le moment qu'une conjecture, et le voyage dans le temps reste une possibilité. Pour résoudre la question, il faudrait réussir à unifier la mécanique quantique et la gravitation, peut-être avec une théorie telle que celle des cordes ou ses extensions. Il est même envisageable d'obtenir une preuve expérimentale des voyages temporels dans les années à venir ; le nouvel accélérateur de particules de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), le LHC (*Large Hadron Collider*), serait capable de créer des trous de ver microscopiques, si certaines nouvelles théories sur la gravitation sont avérées. Même si ces trous de ver disparaissaient aussi vite qu'ils sont apparus, ils survivraient suffisamment longtemps pour que les particules exécutent d'éphémères boucles causales. On serait encore loin de la machine à voyager dans le temps de H. G. Wells, mais cela modifierait à jamais notre représentation de la réalité physique. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. Davies, *Comment construire une machine à explorer le temps ?*, EDP Sciences, 2007.

J. R. Gott III, *Time travel in Einstein's universe : the physical possibilities of travel through time*, Houghton Mifflin, 2001.

K. S. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps : L'héritage sulfureux d'Einstein*, Flammarion, 2001.

L. Ford et T. Roman, *L'énergie négative*, *Pour la Science* n° 271, mai 2000.

P. J. Nahin, *Time machines : time travel in physics, metaphysics, and science fiction*, American Institute of Physics, 1993.

L'Univers aux limites de

Alain Riazuelo

L'ESSENTIEL

✓ L'expansion cosmique dilue le contenu de l'Univers. Mais que va-t-il advenir à long terme des objets qui le peuplent ?

✓ Les étoiles et les planètes s'effaceront d'abord, avant que les galaxies ne se dispersent. Plus tard, les trous noirs eux-mêmes s'évaporeront.

✓ À très long terme, la matière pourrait se désintégrer entièrement.

✓ Autre possibilité : sur des échelles de temps incommensurables, seuls de petits agrégats de fer stables subsisteraient.

À première vue, l'histoire de l'Univers est bien connue. Les observations actuelles nous révèlent que l'Univers est en expansion, et qu'il était plus dense et plus chaud par le passé. Il est issu d'une phase extraordinairement dense et chaude, il y a environ 13,7 milliards d'années : le Big Bang. Les différentes observations astronomiques permettent de détailler la plupart des étapes de ce scénario avec une remarquable précision.

Moins d'une seconde après le Big Bang, l'antimatière avait disparu. Dans les trois minutes suivantes furent synthétisés les premiers noyaux atomiques qui, 380 000 ans plus tard, capturèrent les électrons pour former les premiers atomes. Quelques dizaines de millions d'années plus tard, les premières étoiles s'allumèrent. Puis ce fut le tour de notre Galaxie, qui s'est formée il y a environ dix milliards d'années, suivie par le Soleil il y a 4,5 milliards d'années. La vie unicellulaire apparut 700 millions d'années plus tard, puis la vie évoluée, les dinosaures, les mammifères, et enfin l'homme.

Fin de l'histoire ? Pas vraiment. Car l'Univers a encore de beaux jours – ou plutôt une longue nuit – devant lui. L'une des grandes questions de la cosmologie est celle du devenir de l'expansion de l'Univers. Selon les propriétés de son contenu matériel, les modèles indiquent que l'expansion cosmique se poursuivra indéfiniment ou au contraire s'arrêtera et cédera la place à une phase de contraction aboutissant à un « Big Crunch », sorte de Big Bang à l'envers.

Les observations actuelles indiquent que l'Univers est majoritairement rempli d'une forme mystérieuse de matière, l'énergie sombre, qui provoque une accélération de l'expansion cosmique. Ainsi, tout porte à croire que l'expansion se poursuivra indéfiniment, si tant est que les propriétés de l'énergie sombre ne changent pas dans le futur. C'est dans ce cadre que nous allons passer en revue ce que pourraient être les événements marquants de l'histoire de l'Univers à très long terme.

Quelques dizaines ou centaines de millions d'années après le Big Bang, les premières étoiles ont illuminé le cosmos.