

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.

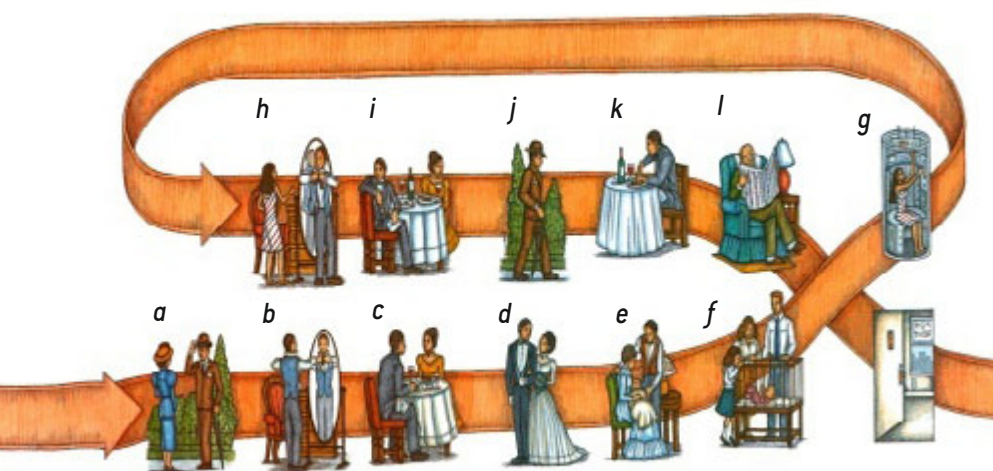
Achille et la tortue

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.

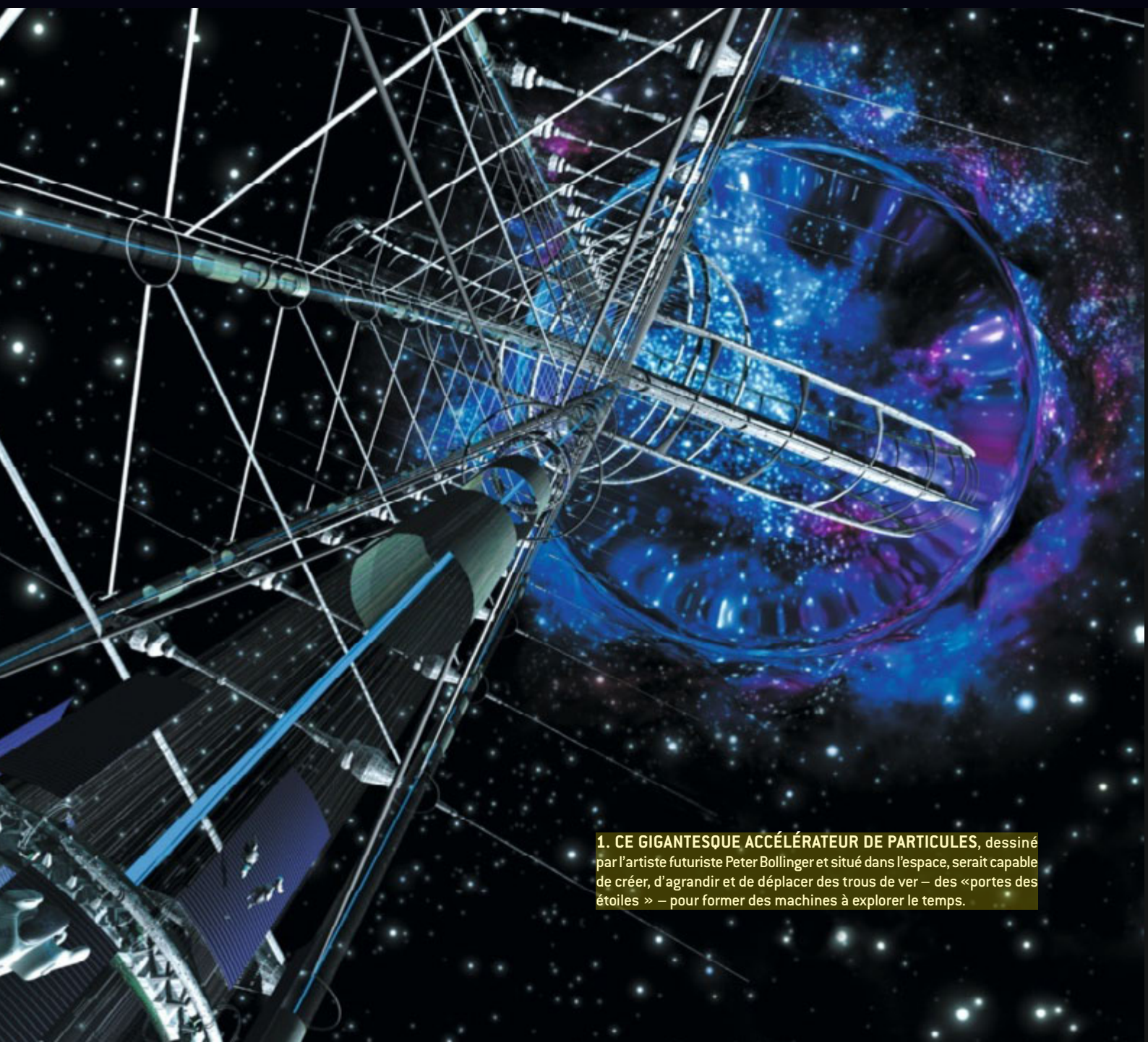
Poincaré a montré que tout système revient à un état proche de son état initial, mais le temps d'attente, jamais infini, peut dépasser l'âge de l'Univers... La réversibilité n'est pas constatée, car elle demande des temps de récurrence trop longs : si nous voulions voir le café au lait se séparer, il 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 le 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 Dinkler