

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.

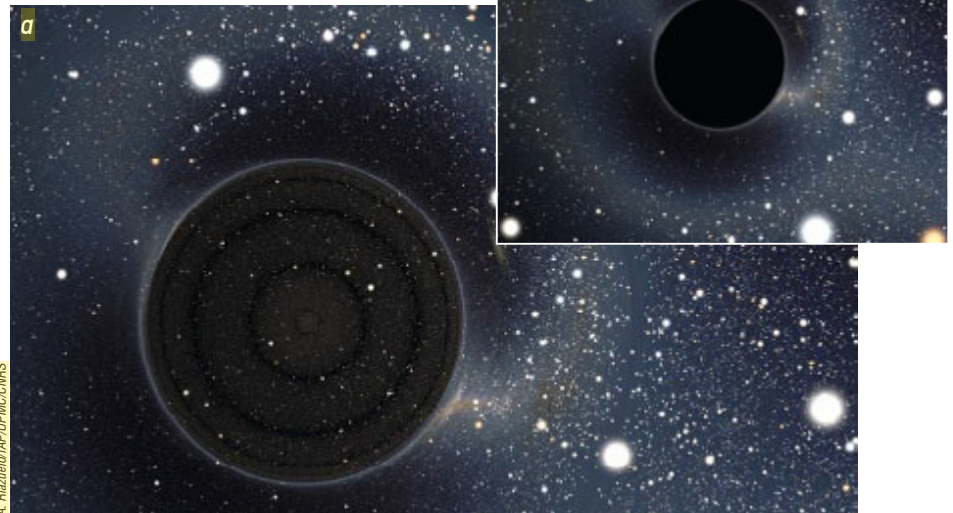
La « porte des étoiles »

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.

L'AUTEUR



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