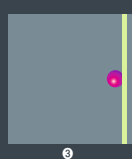
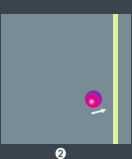
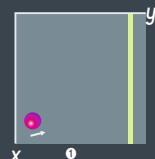
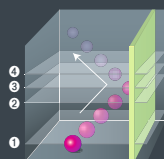
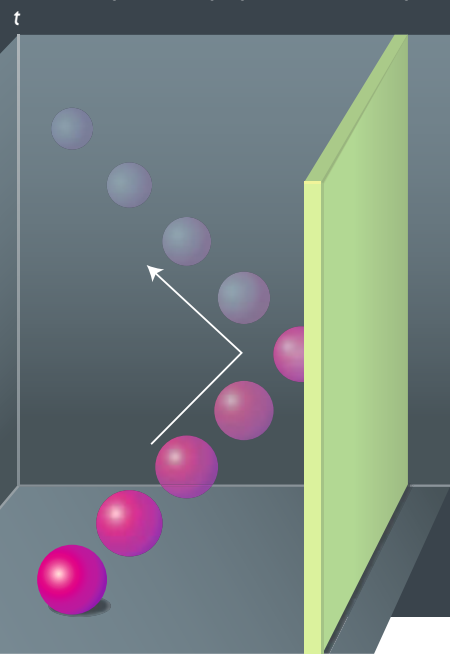
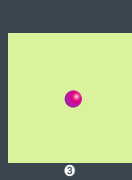
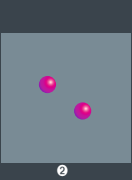
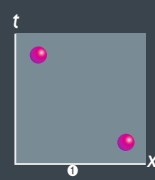
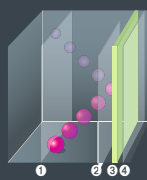


EN QUOI LE TEMPS EST DIFFÉRENT DE L'ESPACE

Physiciens, artistes et graphistes représentent d'ordinaire le temps comme une dimension supplémentaire de l'espace. L'espace-temps ainsi construit est représenté ici, avec une dimension spatiale de moins, comme un bloc tridimensionnel dans lequel une balle rebondit sur un mur. Selon la théorie de la relativité, où l'espace et le temps ne sont pas indépendants, l'espace-temps peut être découpé de différentes façons. Mais toutes ne sont pas aussi judicieuses.

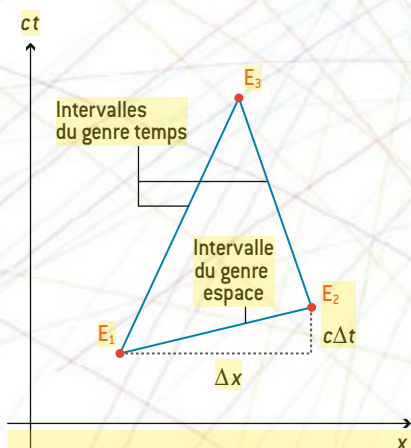


L'approche classique consiste à prendre des tranches d'espace à des instants successifs, ce qui crée un film du mouvement de la balle. Chaque image conduit à la suivante, conformément aux lois usuelles de la physique.



Dans une approche alternative, on considère des tranches non pas du passé vers le futur, mais de gauche à droite. Chaque tranche mélange espace et temps. À gauche du mur, la balle apparaît en deux positions ; à droite, elle n'apparaît pas du tout. Il est normal que ce découpage semble étrange : il rend les lois de la physique très difficiles à manier.

Melissa Thomas



2. DANS L'ESPACE-TEMPS, deux événements séparés par un intervalle du « genre espace », c'est-à-dire tel que $c \Delta t < \Delta x$ (où c est la vitesse de la lumière), ne peuvent influencer l'un sur l'autre (cas des événements E_1 et E_2). Pour qu'il puisse y avoir un lien de causalité, l'intervalle doit être du « genre temps » ($c \Delta t > \Delta x$) : un signal lumineux a alors le temps d'aller d'un événement à l'autre (cas de E_1 et E_3 , ainsi que de E_2 et E_3).

est une propriété absolue, indépendante de l'observateur. De plus, le temps doit être continu afin que l'on puisse définir la vitesse et l'accélération.

Le temps classique doit également être doté d'une notion de durée permettant de quantifier ce qui sépare les événements dans le temps. Pour dire qu'un guépard peut courir à 110 kilomètres par heure, nous devons avoir une mesure de ce qu'est une heure. Et tout comme l'ordre des événements, la durée est indépendante de l'observateur en physique newtonienne.

Pour l'essentiel, Newton supposait donc que le monde est muni d'une horloge maîtresse. La physique newtonienne écoute le tic-tac de cette horloge et d'aucune autre. Newton pensait en outre que le temps s'écoule et que cet écoulement définit une flèche indiquant le futur ; mais ces caractéristiques supplémentaires ne sont pas strictement exigées par les lois newtoniennes.

Le temps de Newton peut nous sembler suranné, mais en y réfléchissant un peu, on peut remarquer à quel point cette conception est étonnante. Ses nombreuses caractéristiques (ordre, continuité, durée, caractère absolu de la simultanéité, écoulement et flèche d'écoulement) sont, en toute logique, indépendantes ; mais l'horloge maîtresse que Newton nommait « temps » les regroupe toutes. Et ce cocktail de caracté-

ristiques était si performant qu'il est resté intact durant près de deux siècles.

Puis vinrent les assauts de la fin du XIX^e siècle et du début du XX^e. Le premier fut donné par Ludwig Boltzmann. Ce physicien autrichien fit remarquer que comme les lois de Newton sont tout aussi valides lorsqu'on renverse le temps (autrement dit, ces lois restent inchangées si l'on y change la variable temporelle t en son opposée, $-t$), le temps n'est pas doté d'une flèche intrinsèque. Pour Boltzmann, la distinction entre passé et futur n'est pas inhérente au temps, mais émerge des asymétries dans l'organisation de la matière dans l'Univers. Bien que les détails de cette proposition soient encore débattus, Boltzmann avait de manière convaincante dépossédé le temps newtonien de l'une de ses caractéristiques.

Einstein lança l'assaut suivant en éliminant la simultanéité absolue. D'après sa théorie de la relativité restreinte, la détermination des événements qui se produisent au même instant dépend du mouvement de l'observateur. La véritable arène des événements n'est ni le temps ni l'espace, mais leur réunion : l'espace-temps. Deux observateurs se déplaçant à des vitesses différentes ne seront pas d'accord sur l'instant ni sur le lieu où se produit un événement, mais ils seront d'accord sur sa localisation

dans l'espace-temps. L'espace et le temps sont ainsi des concepts plus secondaires.

Einstein n'a fait qu'empirer les choses en 1915 avec sa théorie de la relativité générale, qui étend la relativité restreinte à des situations où la gravitation est présente. La gravitation déforme le temps, de telle sorte que l'écoulement d'une seconde ici peut ne pas signifier la même chose que l'écoulement d'une seconde ailleurs. Sauf dans de rares cas, il est alors impossible de synchroniser des horloges et d'obtenir qu'elles restent synchronisées. Il n'est plus possible de considérer que le monde évolue seconde après seconde en étant régi par un unique paramètre temporel. Il devient alors impossible de dire qu'un événement s'est produit avant ou après un autre (voir l'article de Marc Lachièze-Rey).

Le temps était déjà déchu en 1915

La relativité générale met en jeu de nombreuses notions où apparaît le mot « temps » : coordonnée temporelle, temps propre, temps global... Elles remplissent collectivement de nombreuses tâches qui incombaient au temps unique de Newton, mais, isolément, aucune d'elles ne s'impose. Soit la physique n'écoute pas ces horloges, soit, si elle le fait, ces horloges ne s'appliquent qu'à de petites portions de l'Univers ou à des observateurs particuliers. Les physiciens d'aujourd'hui s'émeuvent de ce qu'une théorie unifiée devra éliminer le temps, mais on peut raisonnablement dire que le temps était déjà passé à la trappe en 1915 et que nous ne l'avons pas encore tout à fait intégré.

On serait tenté de penser que la différence entre l'espace et le temps a presque disparu, et que la véritable arène des événements est quadridimensionnelle. La relativité semble transformer le temps en une simple dimension (ou direction) supplémentaire dans cette arène. L'espace-temps est comme une miches de pain que l'on peut découper en tranches de différentes façons, arbitrairement nommées « espace » ou « temps ».

Pourtant, même en relativité générale, le temps conserve une fonction distincte et importante : celle de distinguer localement entre les directions « du genre temps » et celles « du genre espace ». Les événements séparés par un intervalle du genre temps sont ceux qui peuvent être causalement reliés (voir la figure 2) – des évé-

nements tels qu'un objet ou un signal peut passer de l'un à l'autre, et ainsi l'influencer. Deux événements séparés par un intervalle du genre espace sont sans relation causale. Aucun objet ou signal ne peut passer de l'un à l'autre.

Les différents observateurs ne sont pas d'accord sur la succession des événements séparés par des intervalles du genre espace, mais ils sont tous d'accord sur l'ordre des événements séparés par des intervalles du genre temps. Et si, pour un observateur, un événement peut en provoquer un autre (par causalité), il en est de même pour tous les autres observateurs.

Il y a deux ans, dans un essai, j'explorais ce que signifie cette caractéristique du temps. Imaginons que l'on découpe en tranches l'espace-temps du passé vers le futur ; chaque tranche est la totalité tridimensionnelle de l'espace à un instant donné (voir l'encadré page précédente). La somme de toutes ces tranches d'événements (dans chaque tranche, les événements sont séparés par des intervalles du genre espace) est l'espace-temps quadridimensionnel. Alternativement, imaginons que l'on regarde le monde de travers et qu'on le découpe dans ce sens. Dans cette perspective, chaque tranche tridimensionnelle est un étrange amalgame d'événements séparés par des intervalles du genre espace et d'autres séparés par des intervalles du genre temps.

La première méthode est familière aux physiciens ou aux cinéphiles. Les images d'un film représentent des tranches d'espace-temps : elles montrent l'espace à des instants successifs. Un peu comme les passionnés de cinéma qui deviennent l'intrigue et prédisent la suite de l'histoire racontée par le film, les physiciens peuvent prendre une seule tranche spatiale complète et reconstruire ce qui se passe dans les autres tranches spatiales, simplement en appliquant les lois de la physique.

Un découpage étrange

La seconde méthode de découpage n'a pas d'analogie simple. Elle correspond au découpage de l'espace-temps non pas du passé vers le futur, mais d'Est en Ouest. Un exemple d'une telle tranche pourrait être le mur Nord d'une maison et tout ce qui arrivera à ce mur dans le futur. À partir de cette tranche, les lois de la physique permettraient de reconstituer le reste de la maison (et même le reste de l'Univers).

L'AUTEUR



Craig CALLENDER est professeur de philosophie à l'Université de Californie à San Diego, aux États-Unis.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. M. Carroll, *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*, Dutton, 2010.

C. Callender, *Introducing Time*, Totem Books, 2005.

B. Greene, *La magie du cosmos*, Robert Laffont, 2005.

L. Smolin, *Des atomes d'espace et de temps*, *Pour la Science*, n° 316, février 2004.

R. Healey, « Can physics coherently deny the reality of time ? », dans C. Callender, *Time, Reality & Experience*, University of Cambridge, 2002.

C. Rovelli, *Relational quantum mechanics*, *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 35(8), pp. 1637-1678, 1996.
arxiv.org/abs/quant-ph/9609002

✓ SUR LE WEB

FQXi FORUM : The Nature of Time Essay Contest, sur : <http://www.fqxi.org/community/forum/category/10> (voir en particulier les essais de Claus Kiefer, Carlo Rovelli, Julian Barbour et Craig Callender).