

est la causalité : on peut influencer sur certains événements – ceux du futur causal – mais pas sur d’autres – ceux du passé causal. En physique newtonienne, la causalité se confond avec la chronologie.

À chacun sa durée

Or la relativité restreinte – et *a fortiori* la relativité générale – remet en cause toutes ces propriétés. Il est par exemple impossible d’assigner une durée bien définie à un processus physique. Imaginons le trajet d’un photon, de son émission par une étoile à sa réception par un télescope au sol. Bien que l’universalité de la méthode de mesure elle-même pose problème, supposons qu’il existe un tel protocole. Un premier observateur, sur Terre, l’applique et mesure une « durée » t_1 . Un autre, situé sur le trajet, effectue une observation identique, et trouve une durée t_2 , tandis qu’un troisième, se déplaçant le long du trajet, mesure une durée t_3 . La physique newtonienne considère que t_1 , t_2 et t_3 sont trois mesures d’une même grandeur, la durée : elles doivent donc être égales.

Mais de nombreuses observations (cascades de particules engendrées par les rayons cosmiques, désintégration dans les accélérateurs de particules, phénomènes astrophysiques à haute énergie, ainsi que des expériences en laboratoire ou en orbite, etc.) prouvent que ce n’est pas le cas : en général, les valeurs mesurées par différents observateurs ne sont pas les mêmes, écarts que prédisent avec exactitude les théories relativistes.

La seule explication cohérente est que ces mesures concernent en fait des grandeurs différentes ; autrement dit, il n’existe pas de grandeur que l’on pourrait appeler sans ambiguïté « durée » d’un phénomène. Toute autre interprétation cherchant à relier les différentes « durées » mesurées à une durée intrinsèque conduit à des paradoxes.

Il existe pourtant une durée en un sens « plus valable » que les autres. Les équations de la relativité indiquent que dans notre exemple, plus le trajet d’un observateur est proche de celui du photon émis par l’étoile, plus la « durée » qu’il va mesurer est petite. De façon générale, l’observateur qui est lié à un processus et l’accompagne du début à la fin mesurera la durée la plus petite possible. Nommée « durée propre », on peut considérer que c’est la « vraie » durée du processus.

Dans notre exemple, la durée propre du phénomène est celle que mesurerait le photon. Or la relativité indique que la durée propre d’un photon est... nulle. Cela n’est qu’une manifestation du fait qu’il voyage à la vitesse limite, celle de la lumière ; de façon générale, c’est vrai pour toute particule de masse nulle. Ainsi, la durée propre du trajet d’un photon, de son émission dans une galaxie lointaine à sa réception, est nulle. On aurait pourtant envie de dire que le trajet dure des milliards d’années !

Dès lors, comment différents observateurs peuvent-ils comparer les durées entre deux événements donnés ? Chaque observateur ne peut mesurer que sa durée propre, le long de sa trajectoire dans

Les durées dépendent de l’observateur

La notion de durée d’un phénomène est différente d’un observateur à l’autre. Imaginons par exemple un train en mouvement uniforme, qui passe devant une gare. Une impulsion lumineuse est envoyée du sol vers le plafond du train, où elle est réfléchie par un miroir vers son point de départ.

Pour un observateur assis dans le train, la durée du trajet de la lumière est $d = 2h/c$, où h est la hauteur du plafond et c la vitesse de la lumière. Mais pour un observateur sur le quai de la gare, puisque le train a avancé pendant le trajet de la lumière, le point de réflexion

de la lumière au plafond, et encore plus le point d’impact au retour sur le plancher, sont décalés par rapport à la verticale du point d’émission.

Comme ce point de retour ne se trouve pas là où se situe l’observateur de la gare, celui-ci ne peut mesurer directement la durée du phénomène (on dit que cet événement n’appartient pas à sa « ligne d’univers », qu’il décrit dans l’espace-temps.) Il peut cependant reconstituer ce qu’il qualifiera – de façon impropre, au sens strict – de durée du phénomène.

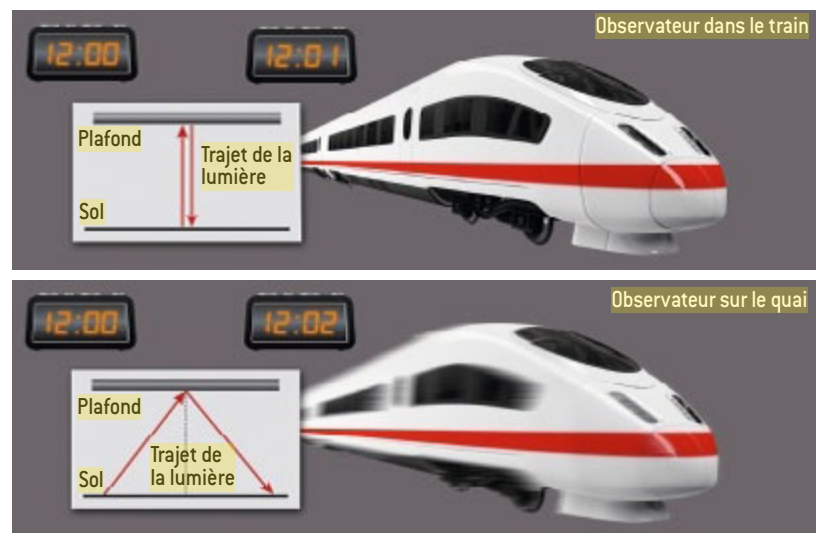
La vitesse de la lumière étant invariante, l’aller-retour

de la lumière dure ainsi plus longtemps observé depuis la gare. Un calcul géométrique simple montre que la « durée » observée depuis le quai est :

$$d' = d / \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

où v est la vitesse du train. Le « temps » du train et le temps de la gare ne sont donc pas identiques.

Cependant, pour avoir une compréhension correcte de la situation, il faudrait comparer les durées de phénomènes se situant sur la trajectoire des différents observateurs dans l’espace-temps. C’est tout l’objet du « paradoxe des jumeaux » (voir l’encadré page suivante).



l'espace-temps (sa ligne d'univers). Or, entre les deux phénomènes, ces trajectoires diffèrent en général. Le « paradoxe des jumeaux », proposé par le physicien Paul Langevin, en est une illustration (voir l'encadré ci-dessous).

En résumé, il n'existe pas de moyen objectif de définir une durée entre deux événements. On peut définir une durée propre, mais celle-ci n'a rien à voir avec ce

que peut mesurer un observateur ; ni avec ce que nous appelons intuitivement durée.

Pour évoquer cette situation, on parle fréquemment de « dilatation des durées » selon les observateurs. C'est un abus de langage. En réalité, il existe seulement différentes mesures, qui concernent des grandeurs distinctes, et il n'y a pas grand sens à les comparer. De même, l'idée que la « vitesse d'écoulement du temps » varierait selon les observateurs n'a pas de sens. Cela suggérerait qu'il y a un temps universel et absolu qui s'écoulerait plus ou moins vite en fonction du contexte. En réalité, il existe simplement différents temps, propres à chaque observateur.

L'absence de durée implique celle de temps absolu. En effet, dans le cas contraire, il suffirait de soustraire la date de fin et de début du phénomène pour mesurer sa durée, comme nous l'avons vu.

Chacun son ordre

Les notions de simultanéité et de chronologie ne résistent pas plus à l'analyse dans le cadre relativiste. Imaginons qu'une supernova explose dans la galaxie d'Andromède et qu'une météorite s'écrase sur Terre. Les phénomènes sont-ils simultanés ? L'un s'est-il déroulé avant l'autre ? Réponse possible : un observateur terrestre voit la météorite tomber avant l'explosion ; un observateur dans Andromède voit la supernova exploser avant la chute ; et l'on peut trouver un troisième observateur pour qui les deux événements sont simultanés (voir l'encadré page 46). Du fait de la vitesse finie de l'information, chaque observateur voit les événements survenir à différents moments en fonction de sa position et de sa vitesse par rapport à eux. L'ordre dans lequel l'un voit des événements contredira l'ordre de l'autre. La chronologie et *a fortiori* la simultanéité sont relatives. Cela est manifestement incompatible avec l'existence du temps universel, car dans ce cas, il suffirait de comparer les dates des événements pour savoir lequel précède l'autre ou s'ils sont simultanés.

La causalité, en revanche, reste un concept parfaitement défini en relativité, même si elle n'est plus équivalente à la chronologie. En physique classique, deux situations sont possibles : soit l'événement A influence l'événement B, qui est alors dans le futur causal de A ; soit au contraire A peut avoir été influencé par B, auquel cas B est dans le passé causal

Durées et trajectoires dans l'espace-temps

Le « paradoxe » des jumeaux, inventé par le physicien Paul Langevin, est l'une des illustrations les plus connues des implications de la relativité sur les notions temporelles.

Deux jumeaux fêtent leur 20^e anniversaire commun. Peu après, l'un part pour un long voyage dans l'espace. Après son retour, ils fêtent un nouvel anniversaire, mais le jumeau resté sur Terre a alors 40 ans, tandis que voyageur n'en a que 30 ! Comment est-ce possible ?

En fait, la situation des deux jumeaux n'est pas symétrique. Entre le point de départ et le point d'arrivée, les deux jumeaux suivent des trajectoires (ou lignes d'univers) différentes dans l'espace-temps (voir le diagramme ci-dessous). La géométrie de l'espace-temps permet de calculer leur « longueur », qui correspond à la durée propre du phénomène pour celui qui suit cette ligne.

Sur la figure, la trajectoire suivie par le voyageur semble plus longue. Mais dans l'es-

pace-temps relativiste, les longueurs ne se comportent pas comme dans l'espace euclidien ordinaire : la géométrie de Minkowski introduit un signe moins entre les coordonnées spatiales et temporelles, ce qui rend le trajet du voyageur plus court, dans cette métrique, que le trajet du jumeau resté sur Terre.



On peut aussi raisonner en termes de géodésiques. Les géodésiques sont les trajectoires que suit un corps en l'absence de toute accélération. Dans le plan euclidien, les géodésiques sont les droites, de longueur minimale. Mais dans la géométrie relativiste, les géodésiques sont

les trajectoires qui maximisent le temps propre.

Or le jumeau resté sur Terre, au repos, suit une géodésique, tandis que le voyageur suit une trajectoire en partie accélérée, qui n'est plus une géodésique. La durée propre mesurée par ce dernier est donc plus petite. Dans le cas limite où le voyageur se déplacerait à la vitesse de la lumière, la durée propre de son voyage serait égale à zéro.

Remarquons que le temps du voyageur ne s'écoule pas plus vite que sur Terre, ou inversement. Les années sont les mêmes pour les deux jumeaux, et les processus biologiques se déroulent au même rythme. C'est comme si vous alliez de Paris à Marseille en passant par Toulouse : vous aurez parcouru plus de kilomètres que par le trajet direct, mais ces kilomètres sont les mêmes. Ici, les deux jumeaux suivent simplement des trajectoires de l'espace-temps qui ont des « longueurs » ou, de façon équivalente, des durées propres, différentes.

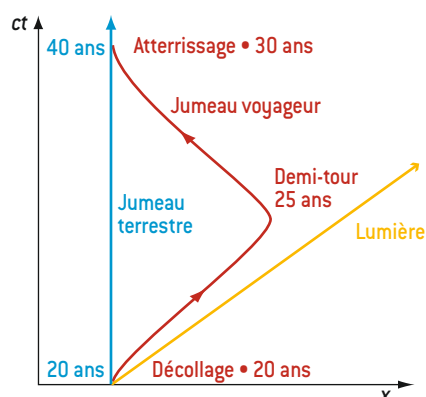


DIAGRAMME D'ESPACE-TEMPS. Dans le référentiel inertiel de la Terre (où, par commodité, ne figure qu'une seule coordonnée spatiale), on a représenté le trajet des jumeaux dans l'espace-temps. La ligne d'univers du frère resté sur Terre (en bleu) est une géodésique. Son jumeau décolle de la Terre et s'éloigne à grande vitesse, fait demi-tour et revient (courbe rouge). De façon contre-intuitive, dans la géométrie de l'espace-temps relativiste, la courbe rouge est plus « courte », en terme de durée propre, que la bleue. La ligne jaune représente la ligne d'univers d'un signal lumineux émis au départ ; elle est de « longueur » nulle.