

La notion de temps

par Jean Kovalevsky, membre de l'Institut*

Introduction : le temps classique

Nous avons de la notion de temps une connaissance primaire, vivant dans un présent coïncé entre un passé qui se cristallise dans nos souvenirs et un futur plein d'inconnu. Cette conscience du temps qui s'écoule est une donnée indissoluble de la vie : la présence du temps se manifeste par tout changement, tout mouvement ou toute évolution. Mais, à ce niveau, on se trouve devant un concept vague, presque virtuel. Nous pourrions dire avec Saint Augustin : "si on ne me le demande pas, je crois savoir ce qu'est le temps ; si on me le demande, je ne le sais plus".

Pourtant, toutes nos expériences personnelles et transmissibles, en d'autres termes notre "bon sens", caractérisent le temps par au moins trois aspects qui paraissent aller de soi.

1°) *La chronologie*. C'est la succession des événements. On classe ceux-ci en les datant. On dira que si A s'est produit avant B, on a :

$$\text{Date (A)} < \text{Date (B)}.$$

C'est la conséquence de deux constatations. L'une est la "flèche du temps" d'après lequel, lorsqu'un événement a eu lieu, il est impossible d'y revenir. L'autre est le principe de causalité: la cause se produit avant la conséquence et a donc une date inférieure. La matérialisation de la chronologie est une échelle de temps, ou encore un calendrier.

2°) *La simultanéité*. Deux événements sont simultanés s'ils se sont produits à la même date, quels que soient les endroits où ils ont eu lieu. Ils ne peuvent pas être la cause l'un de l'autre, mais peuvent évidemment avoir la même cause.

3°) *La durée*. Cette notion implique qu'on peut mesurer le temps, c'est-à-dire construire des horloges. Ainsi, un record est établi lorsque la durée de la course a été inférieure à celle du précédent record, et ce quel que soit le stade où il a été établi. Physiquement, cela signifie qu'on peut définir une unité de temps reproductible avec des durées égales quel que soit le lieu. La conséquence est aussi que la durée entre deux événements simultanés est nulle.

La traduction scientifique de ce temps de tout un chacun est le temps absolu ou newtonien. Celui-ci est le même quel que soit le point de l'Univers où il

* Académie des Sciences - 23, quai Conti - 75006 Paris.

est mesuré et quelle que soit la vitesse, la vitesse de l'horloge et quel que soit le référentiel, par rapport auquel elle est mesurée. Ces référentiels sont d'ailleurs équivalents pour toutes les lois de la Physique s'ils sont en mouvement linéaire et uniforme l'un par rapport à l'autre.

La conséquence la plus simple est que le trajet parcouru par un mobile de vitesse uniforme est proportionnel à la durée du trajet et rien ne s'oppose à ce qu'il y ait des vitesses aussi grandes que l'on veut. Ainsi, un objet A de vitesse V_A sur et par rapport à un objet B ayant une vitesse V_B dans la même direction par rapport à un référentiel est $V_A + V_B$ par rapport à ce référentiel. Nous allons revenir sur cette conséquence.

Le temps en Relativité restreinte

Cette loi de l'addition des vitesses a été contredite par l'expérience de Michelson et Morley. Elle n'est plus vraie lorsque V_A est la vitesse de la lumière. On trouve que :

$$V_A \pm V_B = V_A.$$

C'est un cas limite. En fait, d'après la Relativité restreinte, la loi newtonienne d'addition des vitesses n'est jamais vraie et c'est ce qu'expriment les formules de Lorentz qui sont à la base de la Relativité restreinte. Elles ont, entre autres, comme conséquence qu'il ne peut pas y avoir de vitesse supérieure à celle de la lumière.

- L'espace-temps en Relativité restreinte

La nouveauté de la théorie de Relativité restreinte est d'associer le temps et l'espace, notions totalement disjointes dans la mécanique newtonienne qui postule un temps absolu et un espace absolu. C'est une association sous forme d'un espace-temps dans lequel un événement est défini par quatre coordonnées : trois coordonnées d'espace et la coordonnée temps. Rien de nouveau en apparence, sauf que les quatre coordonnées sont liées et qu'un changement de système de référence les affecte nécessairement toutes les quatre. C'est la raison pour laquelle on appelle ce temps dans un tel système, le temps-coordonnée. On définit ainsi une distance généralisée entre deux événements proches dans le temps et l'espace est:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2,$$

où c est la vitesse de la lumière. La quantité ct a la dimension de coordonnée d'espace tout comme x , y et z . C'est cette variable t qui est appelée temps-coordonnée.

- *Temps propre et temps-coordonnée*

Considérons maintenant deux évènements qui concernent le même objet fixe dans le référentiel choisi (par exemple en son origine). Alors, on a $dx = dy = dz = 0$ et, par suite, on a

$$ds^2 = -c^2 dt^2.$$

Ce nouveau temps, lié à l'objet, que nous notons τ est appelé temps propre, c'est-à-dire celui de l'objet. On peut dès lors écrire la relation fondamentale précédente (ou métrique) de la manière suivante :

$$ds^2 = -c^2 d\tau^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2.$$

En introduisant cette fois les vitesses définies dans le système de coordonnées (donc par rapport au temps-coordonnée), on obtient

$$c^2(d\tau/dt)^2 = c^2 - V^2.$$

On en déduit que, dès qu'il y a mouvement, le temps propre se déroule plus lentement que le temps-coordonnée et que c est la plus grande vitesse possible.

- *Le diagramme de Minkowski*

Visualisons ceci dans le plan $x-t$ (on supposera $y = z = 0$). On y définit un angle (ou cône en dimensions supérieures) qui représente la trajectoire de la lumière. On l'appelle diagramme de Minkowski ou cône de lumière (voir la figure 1, page 9).

Notons d'abord que sur l'axe Ot correspondant à $x = y = z = 0$, c'est-à-dire à l'origine des axes de coordonnées, la vitesse est nulle et on a $d\tau/dt = 1$. Le temps-coordonnée t est égal au temps propre :

$$\tau = t.$$

Sur le cône de lumière, les génératrices représentent le mouvement de la lumière qui atteint l'observateur à l'instant $t = 0$. Dans ce cas $V = c$ et par conséquent, on a

$$d\tau/dt = 0.$$

Les photons de lumière ne vieillissent pas au cours de leur trajet, aussi grand soit-il.

Ce cône est le lieu de tous les événements visibles à l'instant $t = 0$ par O .

Le cône de lumière délimite trois portions d'espace :

- Le passé absolu, correspondant à tous les événements pour lesquels la lumière qui aurait été envoyée lors de cet événement aurait atteint O (sur l'axe Ot) en un instant passé ($t = < 0$).
- Le futur absolu, symétrique du passé absolu par rapport à l'origine, correspondant à tous les événements qui verront la lumière émise par O en un temps $t = t > 0$.
- L'ailleurs absolu, en dehors du cône de lumière, comprend tous les autres événements qui auront été inaccessibles à O à tout instant du passé et jusqu'à un certain temps $t_0 > 0$ où il seront vus par O et à partir duquel ces événements passeront au passé absolu.

- *Observation d'un objet de vitesse non nulle*

Si maintenant on considère un objet se déplaçant à la vitesse V. On constate que $(d\tau/dt)^2 = 1 - (V/c)^2$. Le temps propre s'écoule plus lentement que le temps coordonnée qui est, on l'a vu, le temps propre de l'observateur immobile.

Visualisons ceci sur un exemple (voir la figure 2, page 9) Donnons nous deux miroirs parallèles A et B séparés par une distance L. Une impulsion lumineuse est émise en A et se réfléchit en B puis revient en A et ainsi de suite. Le temps de parcours en un sens, mesuré dans l'environnement de l'expérience (système de référence S1) est

$$t = L/c.$$

Un observateur mobile avec une vitesse v parallèle aux miroirs (système S2) mesure aussi le temps de parcours de la lumière entre les miroirs. Au bout du temps t', les miroirs semblent s'être déplacés de la quantité vt' (segment BB'). Donc pour cet observateur, le chemin parcouru par la lumière est AB' mais, comme la lumière ne peut pas dépasser la vitesse c dans n'importe quel système de référence, il constatera que la vitesse est toujours c et le temps, t'. Dans le triangle ABB', appliquons le théorème de Pythagore pour obtenir :

$$AB'^2 = c^2t'^2 = v^2t'^2 + L^2.$$

En résolvant par rapport à t', on trouve dans ce cas,

$$t' = (L/c)(1 - V^2/c^2)^{-1/2}.$$

On voit que le temps t' mesuré dans le système S_2 , qui est un temps coordonné, est supérieur au temps propre t mesuré dans S_1 . Cette relation peut aussi être déduite directement des équations de Lorentz.

Une illustration frappante est donnée par l'expérience virtuelle dite du paradoxe du voyageur de Langevin. Ce voyageur quitte O avec une très grande vitesse, voisine de la vitesse de la lumière jusqu'à atteindre le point J_1 . Puis il revient vers son point de départ et y arrive en J_2 . Il se retrouve à son point de départ avec un âge inférieur à celui de son jumeau resté immobile. Il a vécu moins longtemps. Pourtant, à l'intérieur de son véhicule, le temps ressenti — le temps propre de la capsule — était inchangé et les horloges ont continué à fonctionner comme si de rien n'était. Pour décrire plus exactement la relation entre le temps-coordonnée t , il faudrait tenir compte des accélérations subies par le voyageur pour atteindre sa vitesse de croisière, puis pour faire demi-tour et enfin ralenti à l'arrivée. Ce calcul doit être fait dans le cadre de la Relativité générale.

Notons encore que, par suite de l'association temps — espace en Relativité restreinte, on constate parallèlement que la longueur d'une règle en mouvement relatif par rapport à un observateur fixe sera, dans le repère fixe, contractée dans la direction du mouvement alors que dans la capsule, sa longueur paraîtra inchangée. Cela résulte d'ailleurs de l'expérience décrite précédemment.

En résumé, le fait essentiel de la Relativité restreinte est la distinction entre le temps propre et le temps-coordonnée (et la longueur propre et la longueur-coordonnée). Auparavant, ces deux notions étaient confondues, et par suite ces distinctions n'étaient même pas imaginées. C'est ce qui fait la difficulté où l'on se trouve pour concevoir cette relativité, cette multiplicité du temps avec toutes les conséquences décrites ci-dessus et qui seront confirmées par la Relativité générale qui y ajoutera d'autres paramètres.

Relativité générale

Bien qu'à quatre dimensions liées entre elles, l'espace-temps de la relativité restreinte est plat. Il est euclidien et la lumière s'y propage en ligne droite dans le vide. L'apport de la Relativité générale a été de dire que la géométrie de l'espace-temps dépend de la présence de masses qui rendent cet espace non-euclidien (courbe).

D'après la loi de Newton de la gravitation universelle, les masses créent en un point A un potentiel qui est la somme des potentiels produits par chacun des éléments de masse M_i en présence et a la forme

$$U_i(A) = -GM_i/r_i,$$

où G est la constante de la gravitation universelle et r_i la distance de ce corps au point A . Dans le cas d'un corps en rotation comme la Terre, il faut y ajouter aussi

l'effet de l'accélération centrifuge. Ainsi, la surface équipotentielle à la surface des océans (le géoïde est telle que la gravité qui lui est perpendiculaire, est la composition de l'attraction newtonienne et de l'accélération de Coriolis.

- L'espace-temps en Relativité générale

En Relativité générale, même s'il y a une quantité, dite potentiel, qui décrit les accélérations et qui s'exprime, à une très bonne approximation près, de la même manière, la gravité ne résulte plus d'une action à distance, mais est une propriété intrinsèque de l'espace-temps. En effet, c'est à travers cette quantité que la présence de matière modifie la métrique L'expression la plus simple de cette métrique, arrêtée au second ordre de la petite quantité $1/c$ est

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + (1 + 2U/c^2)(dx^2 + dy^2 + dz^2) - (1 - 2U/c^2)c^2 dt^2,$$

ou, en considérant les vitesses,

$$c^2(d/dt)^2 = (1 - 2U/c^2)c^2 - (1 + 2U/c^2)V^2.$$

Ainsi, les propriétés de l'espace ne sont plus linéaires (ou euclidiennes) comme c'est le cas de la Relativité restreinte. On dit de façon imagée que l'espace est courbe. Le mouvement d'un point matériel est uniquement régi par cette description des propriétés de l'espace. Il n'y a plus attraction des corps les uns par les autres, mais c'est une propriété intrinsèque de l'espace-temps qui impose un mouvement dont la cinématique est définie par la courbure de l'espace et la vitesse initiale de l'objet. En particulier, les photons suivent une géodésique de cet espace ce qui produit, au voisinage des masses une déviation des rayons lumineux par rapport à une trajectoire rectiligne (qui est une géodésique de l'espace plat de la Relativité restreinte).

- Propriétés du temps en Relativité générale

En particulier, si on considère un point immobile ($V = 0$), et si on applique l'équation précédente, on obtient

$$(d/dt)^2 = 1 - 2U/c^2.$$

Le temps propre diffère du temps-coordonnée par une quantité qui dépend du potentiel. Si celui-ci change, le rapport d/dt change Sans entrer dans le détail des calculs, dans lesquels il ne faudrait pas non plus négliger V , on obtient les propriétés suivantes du temps qui ont toutes été bien vérifiées.

1°) Les horloges paraissent avoir une marche différente à des altitudes différentes. Cette propriété a été vérifiée d'abord à l'aide d'horloges embarquées sur des fusées. Il est actuellement possible de la vérifier entre la cave et un étage supérieur d'un immeuble. On constate que les fréquences émises par des horloges

identiques préalablement comparées côte à côte sont devenues différentes. La différence entre les d/dt au voisinage de la Terre est de l'ordre de 10^{-13} par kilomètre.

2°) L'effet de la vitesse sur ces mêmes horloges a été mesuré plaçant des horloges identiques sur des avions faisant le tour de la Terre dans des sens différents. Notons aussi que l'accroissement de la durée apparente de vie de ions radioactifs lancés dans des accélérateurs de particules correspondent au même phénomène dont une partie seulement est expliquée par la Relativité restreinte, puisque le mouvement n'est pas rectiligne et subit donc des accélérations.

Conclusions

L'essentiel des propriétés du temps était déjà présent dans la théorie de la Relativité restreinte, la Relativité générale les compliquant par suite de l'action des masses sur l'espace-temps.

Tant que l'observateur reste dans son "cocon", il est soumis à son temps propre. Il peut l'étendre à son environnement proche, tant que les différences de vitesse ou de potentiel peuvent être négligées. Cet environnement est d'autant plus grand que la précision avec laquelle il a besoin d'observer ou d'agir est faible. Dans cet environnement, il confond le temps propre et le temps coordonné. Il est au centre de son "Univers" et utilise son temps propre. Dans cette bulle, toutes les propriétés du temps absolu sont vérifiées et son "bon sens" ne le trompe pas. Il peut appliquer à son temps les trois propriétés newtoniennes relatives à la chronologie, à la simultanéité et à la durée. Ainsi, toutes les lois de la physique y sont vraies.

En revanche, dès qu'il s'écarte de son environnement (qui peut être très petit si le potentiel est très fort comme autour des pulsars ou des trous noirs) et qu'il considère des événements plus lointains, le temps qu'il utilise est le temps coordonné et non plus son temps propre dans lequel il est habitué à penser. Toutes les propriétés de ce temps sont liées au fait que les théories de la Relativité ont accru la complexité de la structure géométrique et cinématique de l'Univers et on ne peut plus en faire une description linéaire qui est celle du "bon sens". Résumons-en les conséquences.

1°) *La durée.* L'exemple du voyageur de Langevin montre de façon frappante que la mesure de la durée entre deux événements (le départ et l'arrivée du voyageur) dépend des références de celui qui la mesure. La dépendance vis-à-vis du potentiel renforce encore le caractère non absolu de cette notion.

2°) *La simultanéité.* Comme la durée, c'est une notion également relative à l'observateur. Pour démontrer la simultanéité de deux événements, il faut que leurs instants soient déterminés par des horloges marquant la même heure et ayant la même marche. C'est le problème de la synchronisation d'horloges situées

à des potentiels différents et en mouvement l'une par rapport à l'autre. Or, on démontre que la synchronisation n'est pas transitive. Si les horloges A et B sont synchronisées et si B et C sont aussi synchrones, les horloges A et C ne sont pas en général synchrones. Il s'ensuit que deux événements P et Q qui sont observés en un lieu donné comme s'étant produits au même moment, ne le seront pas dans le système de référence d'un autre observateur. Ainsi encore, la notion de simultanéité absolue n'existe pas.

3°) *La chronologie.* Dans un environnement proche, là où le temps propre est une approximation adéquate du temps-coordonnée, la relation entre la cause et les effets est vérifiée, et il n'y a pas de retour en arrière. En revanche, la vision du monde, qui est nécessairement liée aux référentiels, peut inverser la chronologie. En effet, considérons les événements P et Q ci-dessus, qui sont simultanés pour un observateur et ne le sont pas pour d'autres. Un observateur estimera que P précède Q, alors qu'un autre arrivera à la conclusion opposée, inversant ainsi la chronologie de ces événements.

Figure 1 - Cône de lumière et voyageur de Langevin

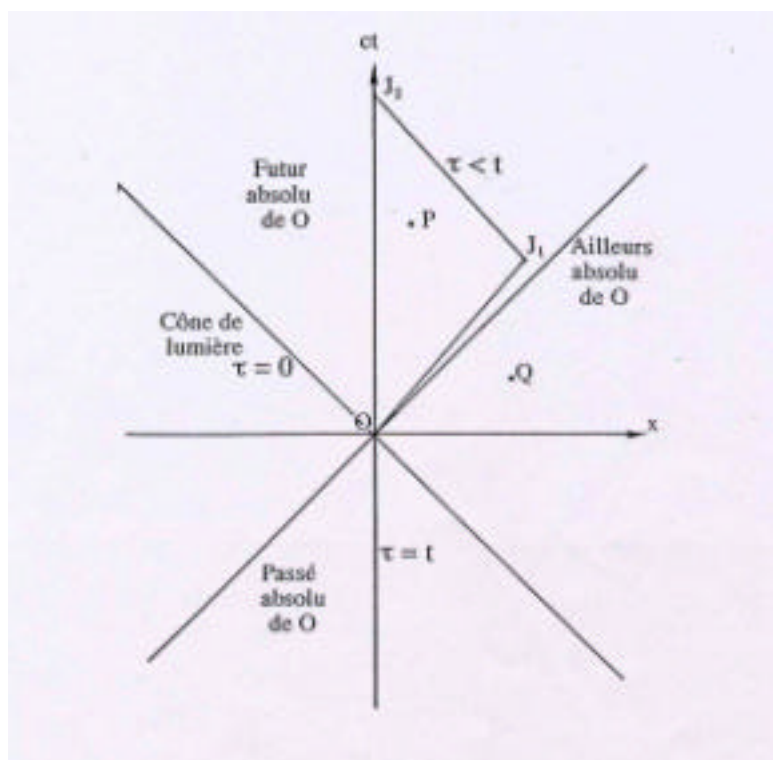


Figure 2 - Visualisation de la dilatation du temps

