

## LA SPÉCIFICITÉ DU TEMPS DANS L'ESPACE-TEMPS

F. BONSAK

En Relativité restreinte, le temps a une situation un peu ambiguë.

D'une part, il perd son splendide isolement : il est intégré à un espace-temps à quatre dimensions et joue, dans cet espace, le rôle d'une dimension ordinaire.

Exemple : on appelle «point d'univers» un point de l'espace-temps, c'est-à-dire un point de l'espace à un instant donné (un événement localisé et daté). Et on peut définir un quadrivecteur spatio-temporel entre deux tels points-événements. Ce quadrivecteur peut être purement spatial si les événements sont simultanés ( $\Delta t = 0$ ), ou purement temporel si les événements se passent à un même endroit de l'espace ( $\Delta x = 0$ ).

Or les formules de transformation qui permettent de passer d'un système de référence à un second en mouvement par rapport au premier (formules de Lorentz) ont une forme qui rappelle de façon frappante une rotation qui impliquerait l'espace et le temps :

Formules de Lorentz

$$x' = x \operatorname{ch} \alpha - t \operatorname{sh} \alpha$$

$$t' = t \operatorname{ch} \alpha - x \operatorname{sh} \alpha$$

$$(v = dx/dt = \operatorname{th}(-\alpha))$$

Rotations

$$x' = x \cos \alpha + y \sin \alpha$$

$$y' = y \cos \alpha - x \sin \alpha$$

$$(dx/dy = \operatorname{tg}(-\alpha))$$

Tout comme les rotations, elles peuvent en quelque sorte transformer une composante en une autre : de l'espace en temps (un quadrivecteur spatio-temporel purement spatial dans un système peut acquérir dans un autre une composante temporelle), ou du temps en espace (un quadrivecteur purement temporel dans un système peut acquérir dans un autre une composante spatiale).

Ces énoncés abstraits ne cachent rien de très mystérieux : le second était déjà valable en cinématique classique : il signifie simplement que deux événements non simultanés qui se passent au même endroit par rapport à un système ne se passeront pas au même endroit dans un système en mouvement par rapport au premier. Par exemple, par rapport au système du train, l'événement «je m'assieds au départ» et «je me lève à l'arrivée» se passent au même endroit, mais par rapport au terrain, au pays, ces deux événements se passent à une distance qui peut être considérable s'il s'est écoulé entre eux un temps suffisant.

Quant au premier énoncé, il est nouveau et traduit la relativité de la simultanéité : deux événements dont le quadrivecteur spatio-temporel a une composante temporelle nulle dans un système sont simultanés dans ce système; ce quadrivecteur pourra,

dans un autre système en mouvement par rapport au premier, acquérir une composante temporelle, c'est-à-dire que les événements se passeront à des temps différents. C'est une propriété qui introduit une certaine symétrie entre l'espace et le temps, symétrie qui n'existait pas en cinématique classique, où l'on avait simplement  $t = t'$  pour toute paire de systèmes.

Autre exemple :

En cinématique classique, on calcule la vitesse en dérivant chaque coordonnée par rapport au temps : on obtient ainsi un vecteur dont les composantes sont celles de la vitesse selon  $x$ , selon  $y$  et selon  $z$ . Cette vitesse peut être grande ou petite ou même nulle, c'est donc un vecteur de longueur variable.

Au contraire, en cinématique relativiste, on calcule une «quadrivitesse» à quatre composantes, où l'on dérive non seulement les trois composantes spatiales, *mais aussi la composante temporelle* par rapport à  $s$ , qui est la distance spatio-temporelle dont nous avons parlé tout à l'heure. Et cette vitesse est un vecteur de longueur 1, un vecteur-unité. En cinématique relativiste, toutes les vitesses sont équivalentes, il n'y en a pas de grandes et de petites, elles deviennent dans l'espace-temps quelque chose d'analogue à ce qu'est une direction dans l'espace. Bien sûr, il subsiste des vitesses relatives, l'équivalent d'angles entre des vecteurs-unité, et ces vitesses relatives peuvent, elles, être grandes ou petites.

On peut s'étonner qu'on appelle «vitesse» quelque chose d'aussi différent de la vitesse classique. Mais on a pour cela trois bonnes raisons :

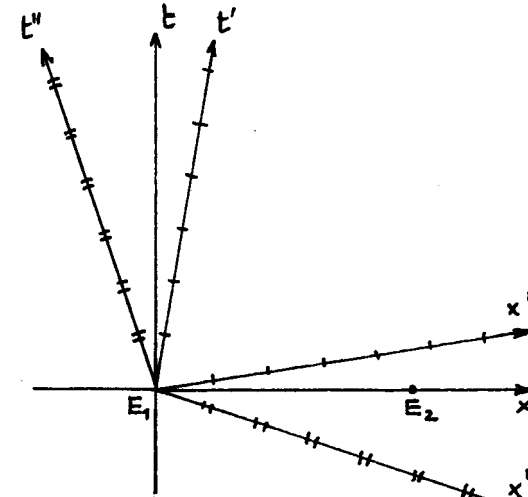
- la quadrivitesse caractérise bien la vitesse, en ce sens que si les quadrivitesse sont les mêmes, les vitesses seront aussi les mêmes;
- le  $s$  par rapport auquel on dérive est, dans le cas particulier, un temps et c'est même le temps propre du mobile;
- la quadrivitesse s'obtient de la même manière que la vitesse, en dérivant les composantes de l'«espace» (ici : de l'espace-temps) par rapport à ce temps.

On pourrait aussi évoquer la symétrie des dérivées partielles et temporelles dans les équations d'ondes et en particulier dans celle des ondes lumineuses.

Dans ces exemples, on voit que le temps devient une coordonnée ordinaire, liée aux autres comme le sont entre elles les coordonnées de l'espace; il apparaît une certaine symétrie entre coordonnées spatiales et temporelles, temps et espace sont liés de façon organique (et non plus de manière artificielle, comme c'était le cas en cinématique classique) en un tout qui est à la fois spatial et temporel, se découpant différemment, dans des systèmes de référence «orientés» différemment, en espace et en temps.

Ceci s'illustre très bien dans une représentation graphique de l'espace-temps (où l'espace est, pour la commodité de la représentation, réduit à une dimension, c'est-à-dire que tous les mobiles se meuvent sur une même droite). L'espace-temps, représenté par le plan du graphique, est découpé en  $x$  et en  $t$  par le système de référence choisi, mais il est découpé en  $x'$  et en  $t'$  par un observateur qui se déplace

à une certaine vitesse vers la droite, en  $x''$  et  $t''$  par un observateur qui se déplace à une vitesse plus grande vers la gauche. On voit, sur ce graphique, la «rotation» dont nous avons parlé tout à l'heure, mais les axes  $Ox$  et  $Ot$  sont ici tournés en sens inverse.



Si les observateurs se croisent au temps  $t = t' = t'' = 0$  au point d'univers  $E_1$ , l'événement  $E_2$  est présent pour celui qui est immobile, passé pour celui qui se meut vers la droite et à venir pour celui qui se meut vers la gauche. Chacun découpe son présent, son passé et son avenir dans un espace-temps commun. Il le découpe non pas arbitrairement, mais en fonction de sa vitesse, de son état de mouvement : tous les observateurs en repos par rapport à lui le découperaient de la même manière. Dans cette représentation, le front du présent progresse en restant horizontal pour l'observateur immobile, il progresse en restant incliné dans un sens ou dans l'autre pour les observateurs mobiles. Il n'y a plus de présent, de passé ou de futur absolus communs à tous les observateurs.

Est-ce à dire que le temps s'est dissout dans l'espace-temps, qu'il a été en quelque sorte spatialisé, qu'il est devenu indiscernable d'une coordonnée spatiale ? — La représentation que nous venons d'utiliser pourrait le faire croire : le temps est bien couché sur le tableau, et on *parcourt* cet espace-temps spatialisé.

Mais attention ! L'*espace-temps* à quatre dimensions n'est pas identique à un *espace* euclidien à quatre dimensions.

Dans un espace à deux dimensions, dans un plan, la distance entre deux points est donnée par le théorème de Pythagore :

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

et cette distance est invariante, elle serait la même dans n'importe quel autre repère orthogonal : les  $\Delta x$  et  $\Delta y$  seraient différents, mais le  $\Delta s$  resterait identique :

$$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \sqrt{\Delta x'^2 + \Delta y'^2}$$

Dans un espace à quatre dimensions, on aurait de même une distance invariante :

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 + \Delta w^2}$$

si  $w$  était la quatrième dimension de l'espace.

Or ce n'est pas la distance spatio-temporelle invariante qu'on trouve dans l'espace-temps; celle-ci présente au contraire un caractère particulier : on attribue au carré de la composante temporelle un signe négatif :

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - \Delta t^2}$$

et ce signe 'moins' est imposé; si l'on choisissait un signe 'plus', il n'y aurait pas invariance du  $\Delta s$ , ni d'ailleurs invariance de la vitesse de la lumière, cette dernière étant confirmée par l'expérience.

Ce signe modifie bien des choses.

D'abord il détruit l'une des symétries entre les coordonnées spatiales et temporelles : le temps est seul à être affecté d'un signe moins.

Ensuite, il transforme la distance spatio-temporelle en pseudo-distance, car deux des axiomes de la distance ne sont pas satisfaits : la distance spatio-temporelle peut être nulle alors que les points ne sont pas confondus et l'inégalité triangulaire change de signe pour la distance spatiale et le temps : la distance entre deux points d'univers n'est plus minimale selon une ligne droite, mais au contraire maximale.

Enfin, l'expression sous la racine peut devenir négative. De telle sorte que les distances spatio-temporelles peuvent être classées en trois catégories :

- les distances du genre espace, qui sont réelles;
- les distances du genre temps, qui sont imaginaires;
- les distances du genre lumière, qui sont nulles.

Or, puisque ces distances spatio-temporelles sont invariantes, ces catégories sont absolues, elles ne dépendent pas du système de référence choisi.

Cela signifie concrètement que les paires de points d'univers peuvent être classées en trois catégories :

- celles pour lesquelles il existe un système où les deux points-événements se situent au même endroit; leur intervalle spatio-temporel est alors purement temporel et, pour tous les systèmes, il est dit «du genre temps»;
- celles pour lesquelles il existe un système où les deux points-événements sont simultanés; leur intervalle spatio-temporel est alors purement spatial et, pour tous

les systèmes, il est dit «du genre espace»;

- celles où les deux points-événements peuvent être reliés par un rayon lumineux partant de l'un et arrivant à l'autre.

Contrairement aux coordonnées d'espace où il existe toujours une transformation qui fait coïncider la nouvelle coordonnée  $Ox'$  avec l'ancienne  $Oy$ , il ne peut y avoir ici aucune transformation qui amènerait une coordonnée spatiale  $Ox$  sur une coordonnée temporelle  $Ot$ , puisque la première est du genre espace et la seconde du genre temps, ces genres étant des invariants relativistes à travers toutes les transformations.

Le temps garde donc toute sa spécificité dans l'espace-temps de la Relativité, tout comme il a une spécificité irréductible dans notre intuition : nous ne ressentons pas l'espace de la même manière que le temps, même si ceux-ci sont liés dans ce qu'on appelle le mouvement et même si la tentation renaît périodiquement de ramener la mesure du temps à une mesure d'espace à l'aide d'un mouvement uniforme.

Puisqu'il y a une spécificité du temps aussi bien dans la théorie que dans l'intuition, il faut soigneusement se garder d'utiliser l'intuition spatiale pour appréhender le temps de la théorie, et pourtant c'est une erreur bien vite commise, à laquelle invite la représentation de l'espace-temps sur une feuille de papier ou sur un tableau noir, celle précisément dont nous avons fait usage tout à l'heure.

On est alors tenté de faire de l'espace-temps un espace appréhendé avec notre intuition d'espace, c'est-à-dire où la coordonnée temporelle est spatialisée, et de se figurer qu'on parcourt cet espace au cours du temps.

Cette image est trompeuse et absurde.

Elle est absurde parce qu'un parcours suppose un temps, un temps en quelque sorte extérieur à l'espace qu'on parcourt.

Or on n'a plus de temps, le temps est déjà dans l'espace, il en est l'une des coordonnées. On ne peut pas le prendre une seconde fois pour donner un sens au mouvement de parcours.

On me dira : «Mais rien n'empêche de prendre deux temps, l'un spatialisé en coordonnée, l'autre auquel on conserverait son caractère temporel, à condition qu'on les fasse varier simultanément !».

— Peut-être. Mais il faudra alors se souvenir que ce qui peut être appréhendé avec l'intuition spatiale, ce n'est pas l'espace-temps spatialisé qu'on parcourt ou qu'on coupe, mais uniquement l'hyper-surface à trois dimensions selon laquelle on le coupe. C'est elle seule qui varie au cours du temps.

Cette image est trompeuse parce qu'elle suggère un espace-temps qui serait là, dont toute l'histoire serait déjà écrite, et qu'on se bornerait à découvrir au fur et à mesure de son parcours. Tous les points de l'espace-temps seraient coexistants dans une sorte de simultanéité éternelle tout comme les points de l'espace sont coexistants dans notre simultanéité et même dans une tranche temporelle d'une certaine épaisseur, lorsque l'espace ne se modifie pas.

Or une simultanéité suppose elle aussi ce temps dont on ne dispose plus puisqu'il est maintenant inclus dans la représentation spatiale. Et le mot 'déjà' suggère une existence (ou un début d'existence) antérieure au moment présent : il présuppose lui aussi une simultanéité à laquelle on a d'autant moins droit qu'il n'y a plus, en Relativité, de simultanéité absolue : on ne pourrait parler de simultanéité — relative — que pour une hyper-coupe de l'espace-temps, non pour l'espace-temps dans son ensemble.

De même, on n'a pas droit à des adjectifs tels que 'figé' pour caractériser l'espace-temps : il est vrai que les points d'univers ne bougent pas, mais comment pourraient-ils bouger puisqu'ils n'ont plus de temps par rapport auxquels ils pourraient bouger ? L'évolution, le mouvement sont dans une modification de l'espace au cours du temps, non dans une modification de l'espace-temps.

Il faut choisir clairement le contexte dans lequel on se situe.

Ou bien ce sera la représentation spatiale de l'espace-temps : le mouvement se traduira alors par la direction non parallèle à  $Ot$  des lignes d'univers parcourues par les points matériels, cette direction pouvant varier le long des lignes. Ces lignes elles-mêmes ne se modifieront pas puisqu'il n'y a plus de temps par rapport auquel elles pourraient se modifier. Seules les coordonnées spatiales varieront en fonction de la valeur de la coordonnée temporelle, et le mot 'mouvement' ne conservera que ce sens-là.

Ou bien alors on maintiendra la coordonnée temporelle dans sa spécificité intuitive, mais on n'aura plus affaire à un espace à quatre dimensions; il y aura d'une part un espace à trois dimensions à appréhender avec l'intuition d'espace, et d'autre part un temps à appréhender avec l'intuition du temps. Ce n'est que dans cet espace tridimensionnel que sera possible un véritable mouvement au cours du temps.

Mais superposer ces deux images, construire un univers en empruntant ici un élément de l'une et là un élément de la seconde ne conduirait qu'à une chimère dont on ne pourrait plus tirer que des conclusions fausses.

Dernière objection : j'ai dit tout à l'heure qu'un événement encore à venir pour un observateur peut être déjà passé pour un autre observateur. Et le mot 'déjà' est licite à condition qu'on l'utilise pour la seule simultanéité absolue qui subsiste en Relativité, la simultanéité au même point — c'est la simultanéité à *distance* qui est relative.

Donc si  $O$  et  $O'$  se croisent en même temps au même point (p.ex. en  $E_1$ ), il peut arriver que  $E_2$  soit pour l'un déjà du passé, donc immuable, et pour l'autre encore à venir, donc en principe ouvert. Comment une même zone de l'espace-temps pourrait-elle être vierge et ouverte pour l'un alors que pour l'autre, elle est un passé auquel rien ne peut plus être changé ? Ce qui est déjà écrit pour quelqu'un doit l'être pour tous, donc notre avenir est déjà écrit.

Malgré son apparente logique, cette objection repose sur une confusion.

Car il y a, en Relativité, deux avenir et deux passés.

Il y a le passé auquel mon point d'univers présent est relié par des intervalles du genre temps; c'est ce qu'on appelle mon cône de lumière passé, qui contient tous les événements qui ont pu agir sur moi jusqu'ici, ceux qui ont pu ou auraient pu m'envoyer des actions causales à des vitesses inférieures ou égales à celle de la lumière.

De même il y a le cône de lumière avenir qui contient tous les événements non écrits sur lesquels je peux ou je pourrais agir, en exerçant des actions causales à une vitesse non supérieure à celle de la lumière.

Or, pour des observateurs se croisant au même endroit, ces cônes-passé et avenir sont communs, puisque le genre temps des intervalles est un invariant relativiste. Ce sont des passé et avenir absolus, communs à tous les observateurs se croisant au même endroit et qui, de ce fait, peuvent s'entendre sur la simultanéité de leur croisement.

Quant à mes passé et avenir dits relatifs, ceux dont me séparent des intervalles du genre espace, il peuvent bien être découpés différemment en passé et en avenir par différents observateurs-acteurs, mais c'est une zone de l'espace-temps sur laquelle aucun de ceux-ci ne peut plus agir et dont aucun ne peut encore avoir reçu de message. Non seulement personne ne peut dire si elle est ou non déjà écrite, mais le serait-elle que la capacité de chacun à déterminer son véritable avenir n'en serait aucunement entamée.

L'ordre temporel n'a d'importance que pour des événements causalement reliés ou du moins causalement reliables; seul, le futur absolu est vraiment futur — et il est vierge pour tous; seul le passé absolu est véritable passé et il est écrit pour tous; ce qu'il y a entre eux, c'est une sorte de présent épais qui ne me concerne plus quant à mes possibilités d'action et ne me concerne pas encore quant à son action sur moi et en particulier à la perception que je puis en avoir. Et il en est de même pour tous les observateurs qui me croiseraient au même endroit.

En résumé, nos intuitions du temps et de l'espace ne doivent pas être appliquées au modèle 'espace-temps' dans son ensemble — elles ne prennent leur sens qu'à l'intérieur de ce modèle, et ceci avec des limitations dues au caractère relativiste de ce modèle (pas de simultanéité absolue !).

Les mots ont un sens dans un certain contexte. Il peut arriver que, dans un autre contexte, ils perdent ce sens. On est cependant tenté de continuer à les utiliser dans ce nouveau contexte, en leur donnant intuitivement le sens qu'ils avaient dans l'ancien — ce qui conduit à une vision totalement déformée du nouveau contexte. C'est justement ce qui se produit avec l'espace-temps de la Relativité : on croit pouvoir le traiter comme un espace et utiliser des concepts tels que 'à la fois', 'déjà', 'immobile', 'parcourir' qui n'ont plus aucun sens dans ce contexte. Une analyse sémantique assez subtile est nécessaire pour découvrir ce type d'erreurs.