

TEMPS, ESPACE ET ESPACE-TEMPS*

F. BONSACK

Mon intention est d'examiner de façon critique quelques citations de physiciens ou de philosophes connus, citations qui donnent une certaine image de l'espace-temps relativiste.

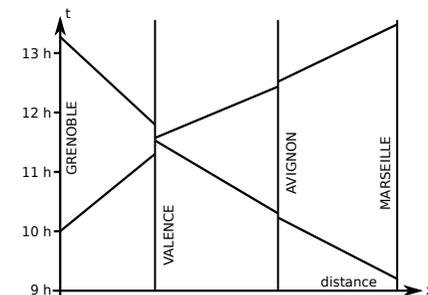
La question que je poserai est celle-ci : cette image est-elle fidèle ? Nous est-elle imposée par le formalisme relativiste ?

Mais je ferai précéder les citations en question d'une brève introduction à l'espace-temps relativiste, qui rappellera à chacun ce qui est en cause. Puis j'analyserai nos intuitions pré-relativistes du temps et de l'espace, ainsi que le langage qui leur est lié, car il est impossible de juger les citations proposées sans élucider le sens des mots qu'elles utilisent et des représentations qu'elles évoquent.

Je signale dès maintenant que je serai amené à des considérations d'une relative subtilité, et qui requièrent donc une certaine attention. Je m'efforcerai d'être aussi clair que possible, en insistant un peu lourdement sur certains points qui me paraissent importants.

1. Introduction à l'espace-temps relativiste

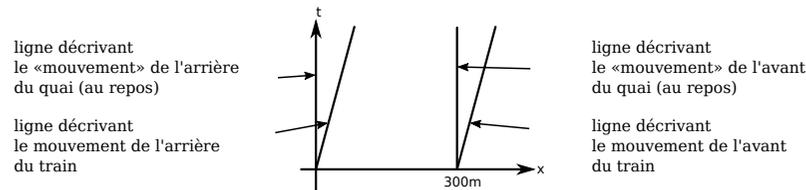
Quelques mots d'abord sur la représentation graphique que j'utiliserai constamment pour illustrer mon propos, et qui se situe d'ailleurs au centre du débat. C'est le diagramme espace-temps bien connu des cheminots, où l'on porte par exemple en abscisse l'espace, la distance kilométrique sur une voie ferrée, et en ordonnée le temps.



* Article publié dans la *Revue de Métaphysique et de Morale*, n° 2 (1983), p. 230-246.

Les arrêts correspondent à des lignes verticales, les déplacements à des lignes plus ou moins raides (les plus raides étant les plus lents). Les trains Grenoble-Marseille décriront des lignes allant de gauche en bas à droite en haut, les trains Marseille-Grenoble de droite en bas à gauche en haut.

On peut aussi utiliser une échelle beaucoup plus grande et graduer la distance en mètres plutôt qu'en kilomètres. Elle conviendra pour décrire le passage d'un train devant un quai, en supposant pour simplifier que le train et le quai ont exactement la même longueur et que, au temps 0, le début et la fin du train coïncident avec le début et la fin du quai. Dans le diagramme, cet événement sera représenté ainsi :



Ces lignes ne sont pas à proprement parler des trajectoires, elles décrivent le mouvement d'un point au cours du temps. En Relativité, on a l'habitude de les appeler des «lignes d'univers».

On pourrait encore enrichir le graphique en dessinant les lignes d'univers des séparations entre les wagons, ou celles du milieu du train et du milieu du quai.

Cet outil étant décrit, on peut entrer dans le vif du sujet.

La coïncidence spatiale et temporelle de deux événements, autrement dit la simultanéité sur place, au même endroit, cette simultanéité ne pose aucun problème et n'a jamais été remise en question par la Relativité. Au contraire, c'est l'élément solide auquel on cherche à se ramener.

Ce qui pose des problèmes, c'est d'une part la coïncidence spatiale sans coïncidence temporelle, qu'on pourrait appeler la *co-localité différée* (même lieu, mais instants différents), d'autre part la coïncidence temporelle sans coïncidence spatiale, qui est la *simultanéité à distance* (même instant, mais lieux différents). C'est la définition de cette simultanéité à distance qui a retenu l'attention d'Einstein.

Mais occupons-nous d'abord de l'autre, de la co-localité différée. Que signifie la phrase «tel objet est resté au même endroit» ? On voit immédiatement qu'il faudra préciser par rapport à quel système de référence l'endroit est resté le même. Si, dans un train, je dépose ma valise dans le filet à bagages, je peux dire qu'elle est restée au même endroit pendant tout le voyage, par rapport au wagon. Mais, par rapport au pays dans lequel j'ai voyagé, elle s'est considérablement déplacée. La co-localité différée n'a donc de sens que relativement à un système de référence.

En est-il de même pour la simultanéité à distance ?

En physique classique, non.

Bien sûr, il faut imaginer un procédé permettant de vérifier si deux événements

sont ou non simultanés. Tout serait très simple si l'on disposait de signaux instantanés, se propageant à une vitesse infinie. Mais de tels signaux n'existent pas, les plus rapides qu'on connaisse étant les signaux lumineux : sur de petites distances, ils sont pratiquement instantanés, mais, si l'on devient plus exigeant, il faut tenir compte du temps qu'ils mettent pour nous parvenir. Ces temps peuvent devenir d'ailleurs considérables sur des distances astronomiques, comme chacun le sait.

Comment déterminer ce temps de transmission ? C'est très simple si l'on connaît la vitesse et la distance. On dira alors simplement (et la physique classique ne trouve rien à redire à cette définition) que deux événements étaient simultanés si les messages qui nous les signalent parviennent en même temps au même endroit, après un voyage de même durée.

Mais la lumière possède cette propriété paradoxale qu'elle a la même vitesse, quel que soit le système dans lequel on la mesure, et quelle qu'ait été la vitesse de sa source. Propriété paradoxale, parce que nous sommes habitués à ce que, si nous nous déplaçons dans le même sens qu'un mobile, sa vitesse relative par rapport à nous diminue, puisse même s'annuler et devenir négative si nous allons aussi vite ou plus vite que lui. Avec la lumière, rien de tel : on peut courir aussi vite qu'on veut après un photon, il aura toujours exactement, par rapport au coureur, la même vitesse qu'il aurait par rapport à un observateur resté immobile.

Si l'on prend au sérieux cette propriété paradoxale, vérifiée avec une grande précision par de nombreuses expériences, et si l'on prend des signaux lumineux pour déterminer la simultanéité à distance (ce qu'il est légitime de faire puisque c'est le signal le plus rapide et que sa vitesse est invariante), le critère de simultanéité se simplifie : pour s'assurer que le temps de transmission a été le même, il suffit de vérifier que la distance parcourue était la même. On dira donc que deux signaux sont partis simultanément de A et B s'ils parviennent en même temps au milieu du segment AB.

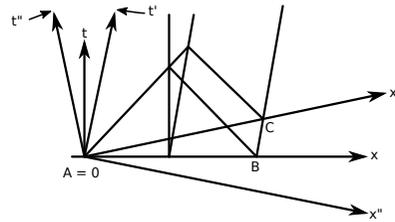
Il faut bien sûr s'attendre à ce que la propriété paradoxale qu'a la lumière de se propager à la même vitesse par rapport à tous les systèmes de référence ait également des conséquences paradoxales quant à la définition de la simultanéité.

C'est bien ce qu'un raisonnement très simple nous permet de voir.

Graduons le diagramme de tout à l'heure en microsecondes pour le temps, et en microsecondes-lumière pour l'espace. Une microseconde-lumière est la distance parcourue en une microseconde par la lumière, soit environ 300m. Si nous choisissons de représenter ces deux unités par la même longueur dans le diagramme, alors les grains de lumière, les photons, décrivent des lignes d'univers inclinées à 45° montant soit vers la droite si le photon est émis de gauche à droite, soit vers la gauche s'il est émis en sens inverse.

Appliquons le critère de simultanéité dans le système du quai. Deux événements A et B se passant aux deux extrémités et donnant chacun lieu à l'émission d'un

éclair lumineux seront dits simultanés si les éclairs arrivent simultanément au milieu du quai. On voit immédiatement qu'ils doivent être émis tous deux au temps 0 pour qu'ils arrivent en même temps et soient donc déclarés simultanés.



Mais ces événements, simultanés dans le système du quai, ne le seront plus dans le système du train. Car le milieu du train se déplace pendant le parcours des photons, il va à la rencontre du photon venant de B et le reçoit donc trop tôt, il fuit par contre le photon venant de A et le reçoit trop tard, puisque celui-ci doit parcourir une distance supplémentaire équivalente au déplacement du train.

Ceci n'aurait aucune importance dans la cinématique classique. Car l'observateur du train dirait : « Certes, si je me place au milieu du train, je reçois le photon venant de B avant celui qui vient de A. Mais cela n'a rien d'étonnant puisque, par rapport à moi, ils n'ont pas la même vitesse et que les temps qu'ils mettent pour parcourir la même distance (la moitié du train) ne sont donc pas identiques. Si je veux que la durée de leur parcours soit égale, il faut que je me place non au milieu du train, mais en un point tel que les distances parcourues par les photons soient inversement proportionnelles à leurs vitesses dans mon système. Et alors, les photons venant de A et de B arrivant là en même temps, A et B resteront simultanés dans le système du train ».

Mais, en Relativité, l'observateur du train n'a plus cette ressource : pour lui, comme pour celui du quai, les vitesses sont les mêmes, et dans les deux sens; il doit conclure que A et B ne sont pas simultanés; c'est au contraire C qui est simultané à A ; si donc on compte les temps et les espaces à partir de l'instant et du lieu où s'est produit A, dont les coordonnées spatio-temporelles sont alors $x = 0, t = 0$ dans le système S du quai, $x' = 0, t' = 0$ dans le système S' du train, C aura lieu au temps $t' = 0$ et l'axe Ox' de l'espace de S' sera AC, alors que son axe des t' sera la droite $x' = 0$, c'est-à-dire la ligne d'univers de l'arrière du train (le train emporte bien sûr son échelle des espaces et son 0 avec lui !) Et je rappelle que, dans un système cartésien, l'axe Ox est la droite $y = 0$, et l'axe Oy la droite $x = 0$).

Les axes des x et des t effectuent donc une rotation en sens inverse, et (on peut le vérifier par des considérations géométriques simples) du même angle, avec ce choix des unités. Si le train allait dans l'autre sens, les rotations se feraient en sens inverse (Ox''t'').

On voit que si, dans le système S, A et B sont simultanés, dans le système S',

B précède A alors que dans le système S'', il le suit. Le « front du présent » de l'observateur O se déplace au cours du temps vers le haut, vers les t croissants, parallèlement à Ox; au contraire, ceux des observateurs O' et O'' des trains circulant vers la droite et vers la gauche progresseront parallèlement à Ox' ou à Ox'', c'est-à-dire selon un front oblique. Chacun découpe différemment son présent, son passé et son futur dans le même espace-temps, ce qui est du passé pour l'un étant déjà de l'avenir pour d'autres qui le croisent au même endroit et au même moment.

La Relativité introduit ainsi une liaison indissoluble entre l'espace et le temps, liaison qui se manifeste entre autres dans le fait que l'axe Ox, qui était purement spatial dans le système S, acquiert une composante temporelle dans les systèmes S' ou S'', de même que l'axe Ot, qui était purement temporel dans S, acquiert une composante spatiale dans S' ou S''. En quelque sorte, du temps se transforme partiellement en espace, et de l'espace partiellement en temps. L'analogie est frappante avec une rotation d'espace, où l'on peut même prendre comme nouvelle coordonnée y' l'ancienne coordonnée x (dans ce cas, il y a transformation totale d'une coordonnée dans l'autre).

Cette liaison entre l'espace et le temps se manifeste aussi dans le fait que l'intervalle temporel entre deux événements A et B ne se conserve plus seul¹ comme en cinématique classique, ce qui permettait de séparer le temps de l'espace. Se conserve au contraire un « intervalle spatio-temporel »²

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

combinaison de la distance spatiale Δx et de l'intervalle temporel Δt . Cette « quadri-distance » reste invariante pour tous les observateurs, alors même que Δx et Δt varient, exactement de la même manière que la distance spatiale

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

se conserve lors d'une rotation d'espace.

2. Les citations

Nous sommes maintenant à même de comprendre les citations que je voulais proposer à votre attention.

Eddington : « Les événements n'arrivent pas; ils sont là, et nous les rencontrons

¹ L'intervalle spatial se conserve en géométrie mais non en cinématique classique, sauf si A et B sont simultanés.

² Je n'ai pris, pour simplifier, qu'une seule des trois coordonnées spatiales, qui suffit pour décrire le mouvement sur une droite donnée.

sur notre passage. La «formalité d'avoir lieu» est simplement l'indication que l'observateur, dans son voyage d'exploration, a passé dans le futur absolu de l'événement en question, et elle est sans importance» [EDDINGTON : *Space, Time and Gravitation*, Cambridge (1920), p. 51].

Weyl : «Le monde objectif simplement est, il n'advient pas» (The objective world simply is; it does not happen» [H. WEYL : *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton Univ. Press (1949), p. 116].

O. Costa de Beauregard : «Les futurs contingents existent en acte, non pas bien sûr dans le présent de nos consciences, mais dans l'épaisseur de l'espace-temps déployé. Ils y sont en tant que futurs (pour nous) et en tant que contingents.

Selon nous, ce n'est donc pas la matière qui s'avance le long du temps (puisque'elle est au contraire étalée le long de la 4^e dimension comme à travers les trois autres); ce sont les psychismes qui s'avancent à travers le bloc de la matière le long de la 4^e dimension. [...] C'est essentiellement la claire conscience ou plutôt (puisque'il faut inclure le cas des animaux) l'*attention à la vie* de Bergson qui se concentre dans un *présent* aigu comme une étrave et se fraye une voie sans halte ni retour le long de la dimension temporelle du cosmos» [O. COSTA DE BEAUREGARD : *Le Second Principe de la Science du temps*, Le Seuil, Paris (1963), p. 131 et 134].

Bergson³ : «Les autres répondraient : [...] Nous pouvons supposer à l'espace une quatrième dimension, que nos sens n'atteignent pas, et à travers laquelle voyagerait précisément notre conscience quand elle se déroule dans le «Temps». Grâce à cette quatrième dimension d'Espace, toutes les images constituant tous les moments passés et futurs de l'univers sont données d'un seul coup avec l'image présente, [...] arrangées dans un ordre [...] que nous n'arrivons pas à imaginer, que nous pouvons cependant concevoir. Vivre dans le temps consiste à traverser cette quatrième dimension, c'est-à-dire à la détailler, à apercevoir une à une les images qu'elle met à même de se juxtaposer. L'indétermination apparente de celle que nous allons percevoir consiste simplement dans le fait qu'elle n'est pas encore perçue : c'est une objectivation de notre ignorance. Nous croyons que les images se créent au fur et à mesure de leur apparition justement parce qu'elles semblent nous *apparaître*, c'est-à-dire se produire devant nous et pour nous, venir à nous. Mais n'oublions pas que tout mouvement est réciproque ou relatif : si nous les percevons venant à nous, il est aussi vrai de dire que nous allons à elles. Elles sont en réalité là; elles nous attendent, alignées; nous passons le long du front. Ne disons donc pas que les événements ou accidents nous arrivent; c'est nous qui leur arrivons. Et nous le

³ Bergson décrit ici une position qui n'est pas la sienne, qu'il imagine pouvoir être prise. Elle est donc particulièrement claire, puisque caricaturale, parce que déjà critique. Par ailleurs, pour rendre sa «démonstration» plus intuitivement compréhensible, Bergson avait ramené à deux le nombre des dimensions de l'espace; j'ai donc systématiquement rajouté une dimension dans la citation.

constaterions immédiatement si nous connaissions la quatrième dimension comme [nous connaissons] les [trois] autres» [H. BERGSON : *Durée et simultanéité*, p. 211-213 de la première et seconde édition, Alcan, Paris (1922 et 1923)].

L'image que ces citations suggèrent est donc celle d'un espace-temps fixe, figé, écrit une fois pour toutes, et qu'on parcourt, qu'on découvre au cours du temps. Il nous faut examiner si cette image, si cette interprétation de l'espace-temps est ou non fidèle.

3. Critique

D'abord une remarque évidente (si évidente qu'on peut finir par l'oublier) : le diagramme d'espace-temps que nous avons utilisé n'est qu'un diagramme, qu'une image, où la coordonnée «temps» est représentée par une coordonnée spatiale.

Et ici, il faut que nous nous interroguions sur ce qu'on a ainsi modifié, c'est-à-dire sur ce qui distingue ce que nous appelons «temps» et ce que nous appelons «espace».

Prenons d'abord le temps.

Nous savons intuitivement bien distinguer le futur du présent et du passé. La représentation d'un événement futur est pour nous toute différente du souvenir d'un événement passé. Quant au présent, c'est en lui que nous agissons (que nous déclenchons nos actions), c'est en lui que nous percevons (que les perceptions parviennent à notre conscience).

Nous disposons d'un certain vocabulaire pour parler de cette échelle de temps; d'adverbes : bientôt, demain, déjà, maintenant, autrefois, etc.; de prépositions : avant, après, etc.; mais aussi de temps pour les verbes : futur, présent, passé, plus-que-parfait, futur antérieur, etc.⁴

Nous avons aussi une certaine intuition de l'écoulement du temps, du présent qui devient du passé, du futur qui devient du présent, tel ou différent de ce que nous l'avons imaginé.

Par ailleurs, nous constatons autour de nous une certaine évolution des choses : des causes entraînent des effets, des phénomènes se produisent toujours dans le même sens : les plantes croissent, les combustibles brûlent et se réduisent en cendres, la pluie tombe.

Cet ordre régulier des phénomènes est universel : nous, nos semblables, les objets qui nous entourent, tous vieillissent, évoluent ensemble dans le même sens. Il n'y a pas ici des objets qui vieillissent et là des objets qui rajeunissent : le temps nous apparaît comme un flux universel dans lequel le monde entier est entraîné. Ce qui ne signifie pas pour autant que tous évoluent à la même vitesse : il y a des objets

⁴ Voir la première partie *Le Temps dans le langage* de *Le Problème du temps* de F. GONSETH, Le Griffon, Neuchâtel (1964).

plus stables que d'autres.

Enfin, la causalité et sa direction unique se répercute sur nos pouvoirs, sur notre liberté d'action. Si l'on veut être strict, nous ne percevons que des événements passés — puisque les messages qui nous les révèlent mettent un temps, certes souvent très court, mais non nul, à nous parvenir. Et sur ce passé nous n'avons plus aucune possibilité d'agir, il est définitivement écrit. Nous pouvons réparer, remplacer, reconstruire, rétablir, mais nous ne pouvons pas faire que ce qui fut n'ait pas été ou ait été autrement. On ne refait pas le passé, sinon en imagination, avec des «si»...

Inversement, nous n'agissons que sur l'avenir, puisque nos actions, nos ordres doivent se propager, se transmettre. Nous croyons agir sur le présent, mais nous agissons toujours sur l'avenir, avec un certain délai, souvent si court que nous ne nous en apercevons pas.

Nous avons donc l'image d'un passé, qui agit sur nous, se signale à nous par des messages qui parviennent jusqu'au présent, mais sur lequel nous ne pouvons plus agir, et d'un avenir ouvert, que nous pouvons dans une certaine mesure influencer, qui devra compter avec nos initiatives pour être ce qu'il sera.

Voilà pour le temps.

Et l'espace ?

L'espace nous est donné dans une certaine simultanéité; les différents éléments qu'il comporte étant donnés tous à la fois, ils coexistent, ils sont juxtaposés en ce sens qu'ils ne s'entraînent pas les uns les autres, mais évoluent parallèlement en interagissant au cours du temps.

Je suis tout à fait conscient du fait que j'ai dû, pour caractériser l'espace, utiliser au moins une notion temporelle : celle de la simultanéité. C'est logiquement évident : si l'on veut une image *purement* spatiale, il faut bien exclure le temps, l'évolution, donc faire une coupe à temps constant, où tous les éléments sont simultanés.

Cette affirmation doit cependant être nuancée.

Nous avons souvent affaire à des éléments relativement stables : relief géographique, cours et plans d'eau, constructions, forêts, routes et voies ferrées. Certes, à long terme, ces éléments se modifient, surtout ceux qui sont faits de main d'homme. Mais ils sont suffisamment permanents pour qu'on puisse dresser des cartes utilisables.

Dans le cas où l'on a affaire à de tels ensembles stables, la simultanéité n'est plus nécessaire pour la définition de l'espace : on a tout le temps pour l'explorer, on est sûr que ce qu'on ne voit momentanément pas continue d'exister tel qu'on l'a vu et qu'on le retrouvera tel plus tard. La tolérance sur la simultanéité, l'épaisseur du présent peuvent alors devenir considérables, et le décalage temporel perdre toute signification.

Mais ce qui est au moins aussi important que la caractérisation séparée du temps

et de l'espace, c'est la notion de mouvement, ou ils sont mis en relation.

Première remarque sur le mouvement : lorsqu'il ne s'arrête pas et ne repasse pas sur un point déjà parcouru, le mouvement permet d'établir une correspondance bi-univoque entre les instants et des points de l'espace. Lorsque le mouvement est uniforme, il y a en outre proportionnalité des intervalles temporels et des distances parcourues. D'où la tentation toujours renaissante de ramener le temps à l'espace ou l'espace au temps par l'intermédiaire du mouvement. On peut citer Aristote : «Le temps est le nombre du mouvement», mais on peut aussi penser aux métaphores que nous utilisons pour parler de l'évolution temporelle : écoulement, progression, cours, etc. qui toutes évoquent un mouvement.

Deuxième remarque : le rapport des variations des coordonnées spatiales et temporelles $\Delta x/\Delta t$ représente une vitesse, alors que le rapport de celles de deux coordonnées spatiales $\Delta y/\Delta x$ représente une direction. Notre intuition de la vitesse est tout à fait distincte de celle de direction. Et d'ailleurs ces deux notions sont dynamiquement très différentes : avec une impulsion de même grandeur, nous pouvons envoyer un corps dans n'importe quelle direction : l'espace est isotrope, si l'on ne tient pas compte de l'anisotropie introduite par le champ gravifique. Par contre, l'espace-temps est loin d'être isotrope : pour communiquer une plus grande vitesse, il faut une impulsion plus forte et s'il y a des frottements, le travail exigé par un mouvement est d'autant plus considérable que la vitesse relative est plus grande. Enfin, une vitesse relative infinie serait, déjà en mécanique classique, pratiquement inaccessible pour des corps de masse non nulle, puisque le travail à fournir pour l'atteindre serait infini. Les lignes d'univers décrivant le mouvement d'un point peuvent donc impunément faire n'importe quel angle avec n'importe quelle coordonnée spatiale; par contre l'«angle» avec la coordonnée temporelle, qui correspond à la vitesse, coûte d'autant plus cher qu'il est plus ouvert, et la perpendicularité est interdite.

Troisième remarque, évidente, mais qu'il ne faut pas oublier : la notion de mouvement et sa négation, l'immobilité, n'ont de sens que par rapport à un temps, et à un véritable temps. Si l'on élimine le temps, par exemple en le représentant par une coordonnée spatiale, ce diagramme n'évolue bien sûr plus, puisque l'évolution est déjà inscrite dans le diagramme. Une évolution du diagramme signifierait une évolution de l'évolution, et cela n'a pas de sens, ni pour le passé, car le passé reste évidemment ce qu'il a été, ni pour l'avenir, car le futur sera ce qu'il sera. On ne peut parler de changement d'évolution que par rapport à ce qu'elle aurait pu être, ou par rapport à ce qu'elle était, mais un changement de direction de l'évolution, c'est encore une évolution, qui s'inscrit dans le diagramme sans qu'on ait besoin de le rendre mobile.

Il ne faut donc pas s'étonner, lorsqu'on a spatialisé la dimension temporelle, que ce qu'on obtient ait les caractéristiques intemporelles d'un espace, pas plus qu'il ne faut s'étonner, lorsqu'on a inscrit l'avenir dans un diagramme, de l'y trouver écrit.

Certes, les mathématiciens peuvent trouver commode d'appeler encore espace cet espace-temps où la quatrième coordonnée s'appelle t et où l'un des carrés de l'intervalle invariant est négatif. Mais il ne faut pas qu'ils oublient que ce mot est alors pris dans un sens considérablement étendu et non plus dans celui que notre intuition et notre langage lui donnent.

Il nous faut maintenant revenir, pour le nuancer et le préciser, sur ce que nous avons dit plus haut de la transformation de l'espace en temps et du temps en espace.

Il est vrai que ce qui était une coordonnée purement temporelle dans le système S acquiert une composante spatiale dans le système S' . Mais ce n'est pas nouveau; cela signifie simplement que ce qui était immobile ($\Delta x = 0$) dans un système change de place ($\Delta x \neq 0$) dans un autre. Parler ici de «transformation de temps en espace» est une expression grandiloquente et finalement trompeuse pour un fait banal.

Il est également vrai que ce qui était une coordonnée purement spatiale dans S acquiert dans S' une composante temporelle. C'est nouveau et cela signifie que ce qui était simultané pour S ($\Delta t = 0$) n'est plus simultané dans S' ($\Delta t' \neq 0$). Ici encore, la transformation d'espace en temps est discutable; il serait plus juste de dire que le fait que les événements A et B , simultanés en S , ne se passent pas au même endroit a pour conséquence, dans S' , un décalage temporel.

Mais jamais ce qui était un pur intervalle temporel dans un système ne peut devenir dans un autre un pur intervalle spatial. Réciproquement, un intervalle purement spatial dans un système ne peut devenir un intervalle purement temporel dans un autre. Donnés deux événements A et B , ou bien il existe un système où la composante spatiale de leur intervalle s'annule (où ils sont co-locaux) et alors la direction AB sera dite du genre «temps», ou bien il en existe un où c'est la composante temporelle de leur intervalle qui s'annule (où ils sont simultanés) et alors la direction AB sera dite du genre «espace». Ainsi, l'espace-temps n'est pas isotrope : les directions peuvent être classées en deux catégories, les directions du genre espace et les directions du genre temps, séparées par une troisième catégorie du genre «lumière». Ces trois catégories sont des invariants relativistes, ce qui signifie qu'une direction qui tombait dans l'une de ces catégories pour un système tombera dans la même catégorie pour tous les autres systèmes.

Ceci se voit très clairement sur la «distance» spatio-temporelle

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

dont nous avons dit plus haut qu'elle était invariante par rapport à tous les systèmes. Certes, cette «distance» ressemble à la distance spatiale invariante en géométrie euclidienne

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

à ceci près que les signes des carrés sont tous positifs pour la dernière, alors que le signe du Δt^2 est négatif pour la première.

Cette «petite» différence de signe change bien des choses. D'abord, il ne s'agit plus d'une vraie distance, car deux points d'univers peuvent être à une distance nulle sans coïncider : il suffit que Δx et Δt soient numériquement égaux (ce qui entraîne $\Delta x/\Delta t = 1$, autrement dit, avec nos unités, il suffit que la vitesse de translation de A à B soit celle de la lumière). Cela n'arrivait jamais dans l'espace euclidien : pour que Δs soit nul, il fallait que Δx et Δy soient tous deux nuls, donc que A soit égal à B .

Plus encore, la distance ainsi définie peut devenir imaginaire, si Δt est plus grand que Δx .

La répartition des directions d'espace-temps dans les trois catégories devient donc extrêmement simple : une direction est du genre espace, lumière ou temps selon que la «distance» spatio-temporelle entre deux de ses points est réelle, nulle ou imaginaire. Et comme cette distance est invariante, ces catégories le sont aussi. Comme l'écrit Costa de Beauregard lui-même, la théorie de la Relativité «maintient et explicite on ne peut plus nettement une distinction catégorique entre les directions du genre espace et celles du genre temps de l'espace-temps; et en outre une distinction catégorique entre les deux orientations possibles des axes de temps qui est sans équivalent du côté de l'espace».⁵

Mais il nous faut voir ce que représentent physiquement ces catégories.

La Relativité admet que tout corps se meut à une vitesse inférieure ou au plus égale (si le corps n'a pas de masse) à celle de la lumière. Il en est de même des influences causales non-matérielles (propagation des ondes, etc.). Vitesse inférieure à celle de la lumière, c'est, avec nos unités,

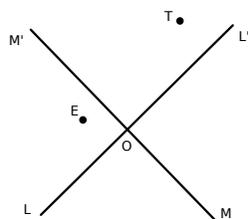
$$\Delta x/\Delta t < 1, \text{ qui entraîne } \Delta x < \Delta t, \text{ donc } \Delta s = \sqrt{\Delta x^2 - \Delta t^2} \text{ imaginaire.}$$

Cela signifie que leurs lignes d'univers suivent toujours des directions du genre «temps», éventuellement du genre «lumière» mais jamais du genre «espace». La causalité est du genre «temps».

Par contre ce n'est que pour des événements A et B où la direction AB est du genre «espace» que l'ordre temporel de A et de B peut s'inverser. Si AB est du genre «temps», l'ordre temporel AB sera le même pour tous les systèmes.

Plaçons-nous en un point d'univers O de l'espace-temps. Et traçons les lignes d'univers LL' et MM' de deux photons allant en sens inverse qui se croisent en ce point d'univers

⁵ *La Notion de temps, équivalence, avec l'espace*, Hermann, Paris (1963), p. 70-72.

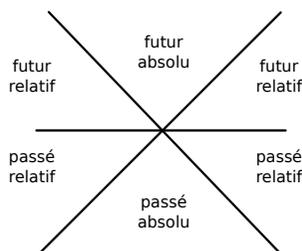


Tous les points d'univers T postérieurs à O tels que OT soit du genre «temps» seront situés dans l'angle supérieur $M'OL'$; puisque l'ordre temporel n'est pas modifié sur les directions du genre temps, T est postérieur à O dans tous les systèmes et l'ensemble des points d'univers à l'intérieur de $M'OL'$ constitueront le futur absolu de O , absolu parce qu'ils sont futurs pour tous les observateurs.

De même, les points d'univers situés à l'intérieur de LOM constituent le passé absolu de O .

Au contraire, l'ensemble des points d'univers tels que E situés à l'extérieur de ces deux angles et tels que OE soit du genre espace constituent ce qu'on appelle l'«ailleurs» de O (son «ailleurs» spatio-temporel, qui n'est pas un ailleurs spatial !).

Les seuls événements qui peuvent avoir une influence causale sur O sont situés dans son passé absolu, les seuls événements sur lesquels O peut avoir une influence causale sont, situés dans son futur absolu. Mais son «ailleurs» ne peut pas plus agir sur lui qu'il ne peut agir sur son «ailleurs». Et ce n'est que son ailleurs que différents observateurs passant en O peuvent découper différemment en un passé et un avenir cette fois-ci *relatifs*.



On voit donc que l'inversion de l'ordre temporel de certains événements n'est pas si grave qu'on aurait pu le craindre. Car, au fond, l'ordre temporel de deux événements qui ne peuvent avoir aucune interaction est assez académique.

Une image me fera mieux comprendre.

Il est utile et instructif de relater, en écrivant l'histoire de France, ce qui s'est passé ailleurs en Europe au même moment. Ceci parce que des événements qui se sont produits ailleurs qu'en France ont pu causer des événements ou motiver des décisions en France, ou parce que la France a pu intervenir ailleurs. Mais est-ce

bien utile de mettre en parallèle ce qui se passait au Japon du temps de Louis XIV, si les frontières de ce pays étaient aussi imperméables qu'on le dit, ou ce qui se passait chez les Incas du temps de Jeanne d'Arc, alors que l'Amérique n'avait pas été découverte ? Ce n'est que lorsque des influences, des filiations sont possibles que l'ordre temporel prend de l'importance. Et on peut se demander si les peuplades de Papouasie qui en sont à l'âge de la pierre ne sont pas plus contemporaines de nos ancêtres que de nous-mêmes, tant que nous n'avons pas de contacts avec eux.

Cela étant dit, revenons à notre critique.

On a choisi de spatialiser le temps : les notions temporelles telles que le passé, le présent, le futur ont perdu leur statut et sont devenues spatiales, le mouvement lui-même est devenu une notion spatiale, les mots «maintenant», «déjà», «pas encore» ont perdu leur sens temporel et prennent eux aussi un sens purement spatial. Il n'y a plus de véritable temps, plus de véritable devenir : l'un et l'autre ont été traduits en termes spatiaux.

Mais, puisque notre intuition du temps diffère de celle de l'espace, appréhender l'espace-temps comme s'il s'agissait d'un espace ne peut conduire qu'à une image fautive : ces points d'univers sont en fait des points-instants, ces lignes d'univers qui nous paraissent données en une fois sont en fait tracées au cours du temps; ce qui nous apparaît comme des inclinaisons de ces lignes est en fait des vitesses; passé, ailleurs et futur nous sont donnés à la fois alors que bien entendu ils n'existent pas simultanément, l'ailleurs est un ailleurs spatio-temporel, donc un ailleurs spatial qui a jusqu'il y a très peu de temps été accessible à notre action et dont nous recevons bientôt des messages, etc. Tout doit être retraduit dans un langage spatio-temporel, parce que la quatrième dimension est irréductible aux trois autres et ne peut être appréhendée que par notre seule intuition du temps.

«Pourtant», m'objectera-t-on, «vos contradicteurs, selon les mots de Bergson, prennent le déroulement de toute l'histoire passée, présente et future de l'univers pour une simple course de notre conscience le long de cette histoire donnée tout d'un coup dans l'éternité; selon eux, les événements ne défileraient plus devant nous, c'est nous qui passerions devant leur alignement. C'est donc qu'ils admettent eux aussi un véritable temps, puisque notre conscience court, passe devant l'alignement des événements».

Cette image nous induit cependant encore, très subtilement, cette fois-ci, en erreur. Car elle suppose un très curieux dédoublement du temps en un temps physique t , représenté par une dimension spatiale, et un super-temps métaphysique τ dans lequel serait plongé l'espace-temps ainsi spatialisé. En effet, lorsqu'on dit que l'histoire nous est donnée tout d'un coup, ce ne peut avoir de sens que dans l'idéale simultanéité d'un super-temps par rapport auquel cet espace-temps serait un espace. Lorsque Weyl dit que le monde objectif (c'est-à-dire l'espace-temps) est, qu'il n'advient pas, il se place encore dans le présent de ce super-temps métaphysique.

Mais il y a plus.

Certes, si vous me permettez d'utiliser une image à trois dimensions pour illustrer une réalité qui en a quatre, on peut couper cet espace-temps spatialisé comme un saucisson, précisément parce qu'il est spatialisé. On peut le couper selon une hypersurface $t = \text{constante}$; la tranche qu'on obtient ainsi est un véritable espace à trois dimensions. Et on peut faire avancer cette coupe le long de la quatrième dimension qu'on a spatialisée, le temps physique t .

Tant qu'on ne regarde que la surface de coupe, c'est-à-dire l'espace, l'image est correcte : on voit cet espace évoluer au cours du temps.

Mais il se superpose à cette image juste une image trompeuse, qui consiste à voir cette coupe avancer le long de la quatrième dimension comme le long d'une dimension spatiale, par un mouvement qui ne peut se concevoir que par rapport à un super-temps, car il faut bien un véritable temps pour qu'il y ait mouvement et on n'en avait plus, puisqu'il avait été transformé en espace.

Bref, on fait une sorte de salade épistémologique avec un vrai temps qu'on détemporalise pour en faire une dimension spatiale, puis qu'on re-temporalise en parcourant celle-ci d'un mouvement uniforme.

C'est cette image trompeuse qu'évoque Bergson pour la critiquer («les événements ne nous arrivent pas, c'est nous qui leur arrivons»), qu'évoquent Eddington («les événements sont là et nous les rencontrons sur notre passage») et Costa de Beauregard («ce n'est pas la matière qui s'avance le long du temps, puisqu'elle est au contraire étalée [notion spatiale !] le long [encore une notion spatiale] de la quatrième dimension comme à travers les trois autres [qui sont spatiales]; ce sont les psychismes qui s'avancent [notion de mouvement] à travers le bloc [notion spatiale] de la matière le long [notion spatiale] de la quatrième dimension» [c'est moi qui souligne et qui commente]).

Le formalisme de la Relativité nous oblige-t-il à considérer notre futur spatio-temporel comme donné, comme déjà écrit, comme étalé dans une sorte d'éternité ?

Avant de répondre à cette question, il faut d'abord lui donner un sens.

Que peut vouloir dire «déjà écrit» ? Le mot «déjà» se réfère à une simultanéité, à un «maintenant» : simultanéité par rapport à qui ? Il est bien sûr que ce n'est pas un «déjà» par rapport à nous : notre futur n'est pas «déjà là», pour nous, ce serait une contradiction dans les termes. Comme le dit Costa de Beauregard, «allez donc faire dire à l'alpiniste accroché à sa paroi que «le sommet est déjà là» ! Il vous prendra pour un mauvais plaisant...».

Alors pour qui est-il déjà là ?

Nous avons critiqué plus haut la conception selon laquelle le futur serait là, en tant qu'espace-temps spatialisé, plongé dans un super-temps. Le futur serait déjà là comme le reste du saucisson est déjà là lorsqu'on coupe la tranche présente; cela signifierait donc que, au moment (métaphysique) où je coupe la tranche t_0 , la tranche t_1 ($t_1 > t_0$) attend (dans un temps métaphysique) que la section se soit

déplacée (par rapport à un temps métaphysique) jusqu'à la section correspondant à t_1 .

Mais qu'est-ce qui me forcerait à supposer que la tranche t_1 est là, attendant d'être coupée, alors que le temps physique en est encore à t_0 ?

«Attention !», dira peut-être un contradicteur, «pendant que vous coupez votre tranche de présent t_0 , d'autres observateurs coupent simultanément une tranche t_0' oblique par rapport à la vôtre, tranche qui entame votre futur; celui-ci doit donc être déjà là. Et vous êtes forcé de prendre au sérieux le mot «simultanément», puisqu'il s'agit d'une simultanéité absolue : les observateurs dont je parle coupent au moment où ils vous croisent, au moment où ils passent à l'endroit où vous êtes !».

Cette objection ne m'impressionne pas beaucoup. Car ce qui peut être présent ou passé pour d'autres observateurs tout en étant futur pour moi, ce n'est qu'un futur relatif, sur lequel je ne peux plus agir, qui est déjà scellé comme s'il était mon passé. Ce qui doit rester ouvert, ce qui ne doit pas être écrit sans moi, c'est mon futur absolu. Et ce futur absolu n'est du passé pour aucun observateur passant à l'endroit où je suis.

Et on peut se demander si l'«ailleurs» est bien nommé, et si sa division en passé, présent et futur relatifs ne suggère pas des interprétations incorrectes. Ne serait-il pas plus juste d'appeler «présent absolu» cet «ailleurs», en se souvenant que ce présent a une certaine épaisseur ? On aurait ainsi une division claire entre un futur, un passé, un présent tous trois absolus, présent dans lequel la division entre un passé, un présent et un futur relatifs est superflue : elle n'a aucune importance physique. Ce présent absolu a toutes les caractéristiques d'un présent classique tenant compte des retards de transmission : il est trop tard pour agir sur ses événements et trop tôt pour que les conséquences de ceux-ci nous aient atteints. La seule différence, c'est l'épaisseur de ce présent (c'est-à-dire le temps qui s'écoule, pour nous autres terriens, entre le moment où est parti le signal lumineux qui nous informe et celui où arrive la réponse que nous envoyons) qui est négligeable sur terre, de quelque deux secondes pour la lune, mais, pour certaines galaxies lointaines, de plusieurs milliards d'années.

4. Conclusion

La Relativité a indiscutablement introduit une liaison entre l'espace et le temps, qui ont cessé d'être séparément invariants : seules les grandeurs spatio-temporelles méritent le nom de réelles parce qu'invariantes; le découpage selon l'espace et le temps étant relégué au rang de «perspective» et variant selon les observateurs.

Il ne faut cependant pas oublier que, même dans cette réalité quadri-dimensionnelle, le temps garde sa spécificité, qu'en particulier les directions des genres temps, espace, lumière sont elles aussi invariantes.

Une interprétation fidèle de l'espace-temps doit donc conserver à la quatrième

dimension la signification intuitive que nous attachons au mot «temps».⁶

Certes, il peut être quelquefois commode de représenter cet espace-temps par un espace proprement dit où l'on décide d'appréhender la quatrième dimension non pas avec notre intuition de temps, mais avec celle d'espace.

Mais il faut alors le faire avec rigueur et conséquence. En particulier :

- il ne faut pas oublier que c'est une représentation et ne pas prendre ce quadri-espace pour le véritable espace-temps;
- il faut se souvenir que, puisque la dimension temporelle a été spatialisée, on n'a plus de temps, plus rien de ce qui fait appel à l'intuition temporelle : ni «déjà», ni «à la fois», ni mouvement, ni immobilité. Il n'y a plus que des trajectoires, des inclinaisons, etc. qui, elles, peuvent être appréhendées par une pure intuition spatiale. On ne peut pas donner à la même coordonnée une interprétation à la fois spatiale et temporelle;
- l'interprétation de l'écoulement du temps pour un observateur comme l'avance d'un front dans un quadri-espace préexistant suppose, pour qu'on puisse parler de mouvement, qu'on plonge ce quadri-espace dans un nouveau temps, distinct du temps physique puisque celui-ci est déjà là, transformé en coordonnée spatiale. On crée donc, en fait, une chimère : une sorte d'espace-temps à cinq dimensions où le temps apparaît deux fois, une fois comme coordonnée spatiale et une fois comme coordonnée temporelle, la première étant parcourue au cours de la seconde. Il va sans dire que cette chimère n'a plus qu'un lointain rapport avec l'espace-temps quadri-dimensionnel de Minkowski.

Ainsi un examen attentif du formalisme relativiste et de ses conséquences d'une part, de notre intuition de l'espace, du temps et du vocabulaire dans lequel nous les traduisons d'autre part, montre que rien ne nous autorise à prendre au sérieux cette image d'une exploration progressive d'un espace-temps préexistant dans lequel notre avenir même serait inscrit.

⁶ La thèse soutenue ici d'une irréductibilité du temps à une coordonnée d'espace pourrait éveiller chez certains lecteurs des résonances bergsoniennes. Il n'est peut-être pas inutile que je précise que les convergences s'arrêtent là et que je suis loin d'épouser les autres positions de cet auteur sur la durée et sur l'irréductibilité de cette dernière au temps des physiciens (qu'il prétendait, à tort, être spatialisé, discontinu et réversible).