Annales de la Fondation Louis de Broglie - Vol. 5, n° 3, 1980

LE TEMPS EN PHYSIQUE NEWTONIENNE ET EN RELATIVITÉ RESTREINTE(x)

par S. KICHENASSAMY
Laboratoire de Physique Théorique
Equipe de Recherche Associée au C.N.R.S. n° 533
Institut Henri Poincaré
11, rue Pierre et Marie Curie
75231 PARIS CEDEX 05

(manuscrit reçu le 7 Mars 1980)

1. Introduction

Si le Temps revêt au gré des impressions subjectives de la vie diverses significations, le temps de la Physique permet avant tout :

a) de déterminer une relation d'ordre (avant - après) dans l'ensemble des évènements,

b) d'associer un intervalle mesurable à deux évènements donnés quelconques.

Nous ne considérons dans toute la suite que ce temps et nous supposons que les conditions de validité d'une telle notion sont réalisées.

(x) Conférence prononcée devant la TABLE RONDE SUR LE TEMPS réunie le 11 Juin 1979 au Centre Georges Pompidou dans le cadre de l'Année Einstein et organisée par la Fondation Louis de Broglie et le Séminaire Philosophie et Mathématiques de l'E.N.S.

Nous rappelons d'abord qu'en Physique, deux points de vue se sont essentiellement succédés :

a) le point de vue *newtonien* : le temps est une entité physique, réelle, préexistant à toute connaissance et que tous les physiciens s'efforcent de saisir au moyen d'une représentation convenable ;

b) le point de vue *relativiste* : le temps résulte d'un certain nombre d'opérations physiques qui le définissent.

Nous précisons ensuite pourquoi un tel changement de perspective a été rendu nécessaire et pourquoi le point de vue relativiste qui heurte peut-être des opinions héritées de l'enfance est encore celui que les faits d'expérience ne contredisent pas. Nous montrons notamment que ce progrès est essentiellement dû à une modification fondamentale dans les postulats de base de la Physique, modification dont il convient de se souvenir lors de toute interprétation des conséquences de la théorie, modification que pour l'essentiel, nous mettons en évidence de la manière suivante : considérons deux horloges H_1 et H_2 de fabrication identique ; nous pouvons effectuer entre elles les deux opérations suivantes :

a) synchroniser H_1 et H_2, i.e. leur faire battre rigoureusement la même unité de temps, ce que nous notons par :

(1.1) $$H_2 \; S \; H_1$$

b) mettre à l'heure H_1 et H_2 *supposées synchronisées*, i.e. faire coïncider leurs indications à tout instant, ce que nous notons par :

(1.2) $$(H_1 \; S \; H_2 \quad \text{et} \quad t_2 = t_1) \quad \Rightarrow \quad H_2 \sim H_1$$

(1.1) et (1.2) définissent des relations d'équivalence.

La Physique newtonienne et la Relativité restreinte s'accordent quant à la synchronisation des horloges mais diffèrent quant aux manières de mettre à l'heure les horloges distantes. Tel est le point essentiel que nous développons dans cet exposé. Malheureusement, tout comme le langage courant confond synchronisation et mise à l'heure, certains physiciens ont mélangé ces deux notions et ont noyé la théorie physique dans les délices des paradoxes. Quoiqu'il en soit, la différence entre les deux conceptions du temps résulte des tout premiers postulats de chacune des théories ; explicitons-les.

2. Le temps en Physique newtonienne

En Physique newtonienne, tout évènement i.e. tout ce qui est

susceptible d'être observé a lieu dans un cadre donné a priori, l'espace et peuvent être ordonnés par rapport à un paramètre, le temps. Dans ses "Principes", Newton estime que l'espace, le temps, le mouvement ... sont des concepts bien connus et qu'il est inutile de les définir. En particulier, le temps est comme une échelle accessible à tous et à laquelle chacun grimpe de quelques degrés ; chacun peut compter les degrés à sa manière, mais tous doivent s'accorder sur l'existence de cette échelle, la même pour tous. Cependant afin de mieux comprendre le contenu physique de ces concepts, essayons d'expliciter la relation qui existe entre ces notions et le mode de repérage des évènements. Ce repérage qui paraît aller de soi est en effet la source du changement de perspective que nous avons souligné au début, car il suppose un certain nombre de postulats dont je ne retiendrai ici que ceux concernant le temps, l'espace devant être soumis à une analyse semblable. Ces postulats n'ont presque jamais été explicités car leur contenu semble aller de soi pour tous.

i) Le repérage d'un évènement E i.e. l'attribution des coordonnées à E s'effectue en général de la manière suivante :

Soit $\{O_a \; ; \; a \in N\}$ un ensemble d'observateurs au repos relatif (i.e. dont les distances mutuelles mesurées avec des règles standard sont constantes) ; ils déterminent un système de référence S d'origine O ; l'observateur O_A situé au point A où a lieu E note sur son horloge H le temps t d'observation et transmet cette information à l'observateur à l'origine O_0 ; celui-ci en conclut que E a pour coordonnées (t, x^i) où x^i fixent la position de A par rapport à O ; la manière dont l'information est transmise n'entre pas en ligne de compte. Or, pour que ce repérage soit cohérent les deux postulats suivants doivent être vérifiés :

Ia. Les horloges H_a et H_b de deux observateurs distincts sont synchrones,

(2.1) $$H_b \; S \; H_a$$

ce qui est admissible car elles ne subissent aucune action. De telles horloges sont appelées horloges standard. Elles définissent chacune le temps local.

Ib. Les horloges standard distantes H_a et H_b sont constamment réglées à l'heure de l'horloge à l'origine O.

(2.2) $$H_a \sim H_0 \sim H_b$$

En Physique newtonienne, ce postulat est de ceux dont l'énoncé est superflu ; en effet, puisque tous les newtoniens se réfèrent au même temps, il va de soi qu'ils parlent du même instant, parlant d'un même évènement. *Tout se passe comme si cette mise à l'heure pouvait s'effectuer "instantanément".*

Le temps local t commun à tous les observateurs $O_a \in S$ est le temps de S. Les points x^i pris au même instant t_0 (i.e. simultanés à t_0) constituent l'espace Σ_{t_0} de S à t_0 ; ces points étant supposés demeurer constamment à la même distance de O, Σ_{t_0} ne dépend pas de l'instant considéré. Ainsi t et Σ ($\equiv \Sigma_{t_0}$) déterminent le temps et l'espace de S. Σ est en outre supposé muni d'une structure d'espace euclidien. Tout évènement E est alors repéré par son instant t et ses trois coordonnées cartésiennes x^i.

Remarque. Tout autre mode de repérage cohérent peut se ramener à celui envisagé ci-dessus.

ii) Considérons maintenant deux systèmes de référence S et S' munis d'horloges $\{H_a\}$ et $\{H'_a\}$ telles que

(2.3) $$H_b \sim H_a \qquad \text{et} \qquad H'_b \sim H'_a$$

Nous pouvons alors définir la translation uniforme de S' par rapport à S en stipulant que la vitesse v^i de S'/S est constante en grandeur et en direction. Notons que cela suppose que la mise à l'heure des horloges H_a ne fasse pas appel à un signal de vitesse donnée.

La Physique newtonienne admet alors outre (Ia, Ib), les deux postulats suivants :

IIa. Les horloges $\{H'_a\}$ et $\{H_a\}$ sont synchrones

(2.4) $$H'_a \; S \; H_a$$

ce qui est compatible avec l'absence de forces.

IIb. Les horloges H'_a et H_a restent constamment mises à l'heure

(2.5) $$H'_a \sim H_a$$

si à un instant donné elles le sont. Ce postulat est en effet nécessaire pour assurer que le temps newtonien soit a priori le même pour tous.

Les coordonnées $(t', x^{i'})$ et (t, x^i) d'un même évènement E sont alors reliées par une transformation du groupe de Galilée :

(2.6a) $$t' = t$$

(2.6b) $$x^{i'} = x^i - v^i t$$

où nous avons supposé que $(t = 0, x^i = 0)$ coïncide avec $(t' = 0, x^{i'} = 0)$ et que les repères cartésiens de S' et S sont parallèles.

Il en résulte que :

a) l'intervalle de temps qui sépare deux évènements E_1 et E_2 est le même selon S' et S :

(2.7a) $$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = t_2 - t_1 = \Delta t$$

b) que les espaces Σ' et Σ de S' et S sont isométrique : l'intervalle de longueur qui sépare deux évènements E_1 et E_2 est le même selon S' et S.

(2.7b) $$\Delta \ell' = \Delta \ell \qquad \Delta \ell^2 = \delta_{ij}(x^i_2 - x^i_1)(x^j_2 - x^j_1)$$

c) que les vitesses w^i et $w^{i'}$ d'un mobile M par rapport à S et S' sont telles que :

(2.8) $$w^{i'} = w^i - v^i$$

iii) Considérons enfin un observateur $\bar{O}$ en mouvement non uniforme par rapport à S ; soit $\bar{S}$ le système de référence associé à $\bar{O}$. La Physique newtonienne admet, outre (Ia) et (Ib), les deux postulats suivants :

IIIa) les horloges $\{\bar{H}_a\}$ et $\{H_a\}$ sont synchrones :

(2.9) $$\bar{H}_a \; S \; H_a$$

ce qui suppose l'existence d'horloges dont le comportement n'est pas modifié par les forces qui causent le mouvement non uniforme

IIIb) les horloges $\{\bar{H}_a\}$ et $\{H_a\}$ mises à l'heure à un instant donné le demeurent à tout autre instant :

(2.10) $$\bar{H}_a \sim H_a$$

Il en résulte que :

a) l'intervalle de temps séparant deux évènements E_1 et E_2 est le même selon $\bar{S}$ et S :

(2.11) $$\Delta\bar{t} = \Delta t$$

b) que les espaces $\bar{\Sigma}$ et Σ de S sont isométriques.

Aussi les postulats (Ia, Ib), (IIa, IIb) et (IIIa, IIIb) garantissent que :

a) le temps t est commun à tous les systèmes de référence ; il est absolu ; de même qu'est absolue la simultanéité de deux évènements distants ($\Delta t = 0$, $\Delta\ell \neq 0$) ;

b) les espaces Σ des divers systèmes de référence sont isométriques, de telle sorte que le mouvement peut être supposé s'effectuer dans un espace commun à tous les observateurs ; Σ détermine alors l'espace absolu.

Ces considérations montrent donc clairement que *les concepts newtoniens d'espace et de temps absolus suppose, quant aux horloges, vérifiés les postulats I, II et III.*

Les systèmes de référence par rapport auxquels tout corps non soumis à des forces continue dans son état de repos ou de translation uniforme sont appelés *systèmes d'inertie*. Le passage d'un système d'inertie à un autre s'effectue au moyen d'une transformation de Galilée (2.6).

Or, si le groupe de Galilée laisse invariantes les équations de la Dynamique newtonienne, il n'en est plus de même des équations de l'électromagnétisme de Maxwell ; en particulier, la vitesse de la lumière dans le vide devrait être variable suivant l'état de mouvement de l'observateur qui la mesure, conformément à la loi de composition des vitesses (2.8) ; inversement, la mesure de cette vitesse devrait permettre de déceler la translation uniforme "absolue" d'un système d'inertie. Cependant, toutes les expériences conçues pour mettre en évidence cette variabilité se sont soldées par des échecs : la vitesse de la lumière dans le vide garde une valeur constante c par rapport à tout système d'inertie !

Ce résultat qui heurte sans doute le sens commun, remettait en question tout l'admirable édifice newtonien :

a) ou bien on pouvait essayer de sauver le cadre newtonien en brisant l'unité de la Physique et en adoptant deux formes de description différentes, l'une adaptée à la Dynamique et l'autre à l'Electromagnétisme (cf. Larmor, Voigt, Veltmann, Potier, Lorentz, Fitzgerald, Poincaré).

b) ou bien on pouvait modifier le cadre newtonien avec A. Einstein qui a admirablement su localiser l'origine des difficultés dans les postulats que nous avons explicités.

L'histoire de la Physique nous montre que c'est la voie b) qui fut choisie.

3. La Relativité restreinte

A. Einstein[(1)(2)] admet en effet pour définir le système d'inertie les postulats Ia, IIa (et même IIIa le cas échéant) concernant l'existence d'horloges standard synchrones ("ideal clocks") et celle du temps local ; mais il remet en question le postulat (Ib) i.e. la mise à l'heure "instantanée" des horloges d'un même système S. La mise à l'heure de deux horloges voisines doit en effet pouvoir être contrôlée à tout moment et doit par suite correspondre à une opération physiquement réalisable. Il propose alors de mettre à l'heure deux horloges synchrones H_A et H_B (H_B S H_A) au repos relatif de la manière suivante :

Soit ℓ_{AB} leur distance ; envoyons un signal électromagnétique de A vers B à l'instant t_{1A} ; il arrive en B à t_B, s'y réfléchit instantanément vers A et revient en A à t_{2A}. On dit que H_A et H_B sont mises à l'heure si on a :

(3.1) $$t_B = \frac{1}{2}(t_{1A} + t_{2A})$$

puisque :

a) d'après l'expérience, le signal électromagnétique se propage dans le vide de manière isotrope et à vitesse constante c par rapport à tout système d'inertie

b) et on a : $$\frac{\ell_{AB}}{c} = t_B - t_{1A} = t_{2A} - t_B$$

On remarquera que le postulat de constance de c suffit à mesurer sa valeur sans mise à l'heure préalable.

A. Einstein substitue donc au postulat Ib, le postulat suivant :

Ib'. Les horloges synchrones H_a de S sont constamment à l'heure de l'horloge à l'origine O, la mise à l'heure s'effectuant suivant la prescription ci-dessus au moyen d'un signal électromagnétique :

(3.2) $$H_a \simeq H_0$$

Les temps locaux définis par H_a ainsi mis en corrélation déterminent le temps de S.

Ainsi de Newton à Einstein la notion de système d'inertie a subi une modification sémantique : les horloges d'un tel système sont équivalentes non plus au sens de Ib mais à celui de Ib'. Nous ne considérons dans la suite que de tels systèmes d'inertie. Cette modification marque un moment important de la pensée scientifique moderne ; elle résulte de ce que fut introduite pour la première fois l'idée que les concepts fondamentaux devraient correspondre à des opérations physiquement réalisables. Ce fut la naissance du point de vue opérationnel en Physique (cf. P.W. Bridgmann), bien que ce point de vue ne demeure pas une exigence profonde de la pensée d'Einstein plus préoccupée par l'intelligibilité du réel.

Considérons maintenant deux systèmes d'inertie S et S', S' en translation uniforme de vitesse v par rapport à S. On a : $H_a \simeq H$ et $H'_a \simeq H'_0$. $\{H_a\}$ et $\{H'_a\}$ sont-elles encore équivalentes ?

Pour y répondre, soit t(t') le temps de S(S') et $\Sigma(\Sigma')$ leur espace ; supposons que les évènements ($t = 0$, $x^i = 0$) et ($t' = 0$, $x^{i'} = 0$) sont confondus.

a) les horloges $\{H'_a\}$ et $\{H_a\}$ ne subissant aucune force, le postulat IIa peut être considéré comme toujours valable :

$$H'_a \; S \; H_a \tag{3.3}$$

b) Soit deux évènements E_1 et E_2. On sait que l'adoption du principe d'inertie, de la constance de la vitesse de la lumière et du caractère continu des transformations permettant le passage d'un système d'inertie à un autre, entraîne entre les intervalles de temps (dt, dt') et de longueur ($d\ell$, $d\ell'$) qui séparent E_1 et E_2 par rapport à S et S', l'égalité suivante(3) :

$$ds'^2 = c^2dt'^2 - d\ell'^2 = c^2dt^2 - d\ell^2 = ds^2 \tag{3.4}$$

sans que l'on ait séparément, comme en Physique newtonienne, $dt' = dt$ et $d\ell = d\ell'$. Supposons maintenant E_1 et E_2 définis par :

$$\text{(3.()}\quad \begin{array}{l} E_1 : (t_1 = 0 \;,\; x_1^i = 0) \;\; / \; S \;\; \text{et} \;\; (t'_1 = 0 \;,\; x_1^{i'} = 0) \;\; / \; S' \\ E_2 : (t_2 = \Delta t \;,\; x_2^i = \Delta x^i) \; / \; S \;\; \text{et} \;\; (t'_2 = \Delta t',\; x_2^{i'} = \Delta x^{i'}) \; / \; S' \end{array}$$

Il est clair qu'un point fixe suivant S ($\Delta x^i = 0$) est en mouvement

par rapport à S' ($\Delta x^{i'} \neq 0$) ; par suite $\Delta x^{i'} \neq \Delta x^i$ et en vertu de (3.3) :

$$\Delta t' \neq \Delta t \tag{3.6}$$

Les indications des $\{H'_a\}$ et $\{H_a\}$, si elles coïncident à ($t' = t = 0$) ne coïncident plus à tout autre instant. *Il est donc abusif de conserver le postulat IIb lorsque la mise à l'heure est admise comme devant être physiquement réalisable.* Il est également abusif de confondre le temps t' de S' et le temps t de S et d'invoquer le temps absolu i.e. commun à tous les observateurs.

(3.6) montre en outre que deux évènements distants simultanés par rapport à S ($\Delta t = 0$, $\Delta x^i \neq 0$) ne sont plus simultanés par rapport à S' ; les espaces Σ' et Σ de S' et S ne sont pas isométriques (par un déplacement euclidien) ; ils ne sont plus absolus.

Ainsi, la seule substitution de Ib' à Ib conduit à l'abandon de l'espace et du temps absolus de Newton et à conférer, en vertu de (3.4), le caractère absolu à l'espace-temps de Minkowski déterminé par l'intervalle élémentaire :

$$ds^2 = \eta_{\alpha\beta}\, dx^\alpha\, dx^\beta = c^2dt^2 - \sum_{c=1}^{3} (dx^i)^2 \tag{3.7}$$

Il convient de souligner que la Relativité restreinte admet comme la Physique newtonienne que les horloges des divers systèmes d'inertie sont synchrones (cf. (2.4) et (3.3) ; mais elle n'admet plus comme cette dernière, leur équivalence permanente, l'équivalence étant comprise au sens de Ib'.

4. Dilatation des durées

Nous allons maintenant dégager la signification physique d'une des conséquences de la théorie d'Einstein qui a beaucoup intrigué le sens commun : la dilatation des durées.

Considérons la translation uniforme d'une horloge standard H' par rapport à un système d'inertie S ; supposons les coordonnées de S choisies de manière que cette translation soit décrite par :

$$x = v\,t \qquad y = 0 \qquad z = 0 \tag{4.1}$$

Soit S' le système d'inertie d'origine H'. Considérons les deux évènements suivants :

E_1 : passage de H' au niveau de $H_1 \in S$ situé à x_1 à l'instant t_1

E_2 : passage de H' au niveau de $H_2 \in S$ situé à x_2 à l'instant t_2.

On a :

$$x_2 - x_1 = v(t_2 - t_1) \tag{4.2}$$

Les coordonnées de ces évènements par rapport à S' sont :

$E_1 : (t'_1 , o , o , o)$ $E_2 : (t'_2 , o , o , o)$

L'invariance (3.4) de l'intervalle d'espace-temps nous donne :

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \qquad \beta = \frac{v}{c} \tag{4.3}$$

La durée du parcours de H' entre E_1 et E_2 est plus longue par rapport à S que par rapport à S' ; on dit que les durées sont dilatées en passant d'un système d'inertie où le mobile est fixe à tout autre système d'inertie. La durée d'un phénomène mesurée dans un système où il a lieu en un point fixe est appelée *durée propre*. On peut traduire (4.3) de la manière suivante :

La durée propre d'un phénomène est la plus courte des durées qui lui sont attribuées par différents observateurs inertiaux.

i) Devrait-on en conclure que l'horloge H' marche plus lentement que les horloges H_a de S ? Certainement non, car d'une part, cela serait contraire au postulat IIa et d'autre part un raisonnement similaire établirait réciproquement que toute horloge $H \in S$ marche plus lentement que les horloges H'_a de S'.

ii) Cette dilatation des durées résulte en effet de ce que les temps de S et S' ne sont pas confondus du fait de la mise à l'heure des horloges au moyen d'un signal électromagnétique ; il convient de noter ici que cette durée est mesurée avec *une seule horloge dans S'* et avec *deux horloges distantes* mais mises à l'heure, *dans S*.

Il est donc faux de parler de marches différentes des horloges en translation uniforme relative, alors qu'on les a supposées toutes synchrones ; par contre, bien que le sens commun en soit heurté, il est juste de dire que la durée d'un phénomène varie d'un système d'inertie à un autre, car leurs temps ne se confondent pas avec le temps absolu newtonien.

Comment cela est-il possible ? Il faut sans doute au sens commun le temps de s'aiguiser, de s'adapter aux exigences des pro-

grès de notre connaissance du réel. N'a-t-on pas été hostile à l'idée que des hommes pouvaient se tenir debout aux antipodes ? Est-on scandalisé d'entendre dire que deux voyageurs partis d'un même instant-point et arrivant au même instant-point par deux chemins différents, ont parcouru des distances différentes ? Dès lors que le temps absolu a été détrôné, il en va de même des durées de parcours mesurées par chacun de ces voyageurs ; ces durées dépendent également du chemin suivi !

5. Conclusion

Ainsi, au temps commun, au temps newtonien que tout le monde pourrait appréhender de la même manière, A. Einstein a substitué un temps, unique quant à sa marche et multiple quant à sa coordination en proposant :

a) de coordonner les temps locaux par un signal physique,

b) d'adopter pour ce signal, le signal dont l'expérience affirme la constance de la vitesse de propagation.

Si le temps instauré par A. Einstein dérange nos évidences héritées de l'enfance et exalte notre imagination, prenons garde de ne pas oublier les fondements physiques de cette notion ; certes, notre vision de tortue ne nous permet pas de saisir dans la vie quotidienne les manquements à la mise à l'heure instantanée ; elle s'accomode du postulat de la constance de la vitesse de la lumière que pourtant sa façon de composer les vitesses devrait scandaliser, mais elle s'accroche à la constance des durées que ce même postulat condamne ! Il faudra bien que nous nous rendions à l'évidence des observations précises du réel et à la cohérence de nos interprétations théoriques.

RÉFÉRENCES

(1) A. Einstein, Ann. der. Phys., sér. 4, 17, 891-921

(2) A. Einstein, Autobiographical notes, p. 55
in A. Einstein : Philosopher scientist, Ed. P.A. Schilpp, Library of living philosophers, Tudor-New York, 1901

(3) S. Kichenassamy, Symposia on Theoretical Physics, vol. 5, 1967, 107-137, Plenum Press.
C.R.A.S. Paris, 259, 4521 (1964).