Le principe de la relativité et la nature du temps

FRANCO SELLERI

1. Mach et le temps absolu de Newton

Selon Newton, le temps possède un caractère absolu en ce sens qu'il existe indépendamment de tous les objets et de tous les événements physiques.

« *Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément et s'appelle durée. Le temps relatif, apparent et vulgaire, est cette mesure sensible et externe d'une partie de durée quelconque, égale ou inégale, prise du mouvement : telles sont les mesures d'heures, de jours, de mois, etc. dont on se sert ordinairement à la place du temps vrai.* »[1]

Malgré l'image neutre qu'il a tenté de projeter, Newton était un théiste ardent et sa théologie hétérodoxe a joué un rôle important dans sa conception du monde physique. Pour lui, le temps absolu et l'espace absolu étaient les conséquences des attributs divins d'éternité et d'omniprésence. Dans le *General Scolium* qu'il ajouta aux *Principia* en 1713, il écrivit :

« *Il est éternel et infini (...) ; ce qui veut dire que sa durée s'étend de l'éternité à l'éternité, et sa présence de l'infini à l'infini (...). Il n'est ni l'éternité ni l'infinité, mais il est éternel et infini ; il n'est ni durée ni espace, mais il dure et il est présent. Il dure de façon permanente et il est omniprésent. En existant toujours et partout, il constitue la durée et l'espace. Puisque chaque parcelle de l'espace est* toujours *et que chaque moment indivisible de durée est* partout, *c'est que le Seigneur, Créateur de toutes choses, ne peut être* jamais *et* nulle part. » Newton ajoute aussi : « *Il est omniprésent, non seulement virtuellement, mais substantiellement et, par vertu, il ne peut subsister sans substance.* »[2]

Ainsi l'espace et le temps newtoniens dépendent de l'existence de Dieu, ils en sont les véritables manifestations, les attributs, et l'on pourrait dire qu'ils sont des composantes de la divinité.

Un critique bien connu des conceptions newtoniennes fut le physicien-philosophe Ernst Mach. Il croyait que tous nos principes physiques résidaient dans la connaissance expérimentale relative aux positions des corps et à leurs mouvements. Selon lui, rien n'était garanti dès lors que l'on étendait ces principes hors des limites de l'expérience : une telle extension serait dénuée de sens dans la mesure où personne ne possède la connaissance requise pour en faire usage. Ainsi, la réalité selon Mach se réduisait aux actes de mesure. L'espace et le temps absolus de Newton, transcendant toutes les définitions opérationnelles, étaient considérés par lui comme de purs produits de l'imagination. Son argument réfutant l'existence de l'espace absolu est demeuré fameux : « *"Toutes" masses, "toutes" vitesses et par conséquent "toutes" forces sont relatives. Il n'y a pas de différence entre l'absolu et le relatif que nous pouvons détecter avec nos sens. D'autre part, il n'y a pas de raison pour que nous admettions cette différence étant donné qu'une telle admission ne nous apporte aucun avantage aussi bien théorique que d'un autre ordre. Ceux parmi les auteurs modernes qui sont convaincus par l'argument newtonien du seau d'eau pour distinguer entre mouvement absolu et mouvement relatif, ne réalisent pas que le système du monde nous est donné "seulement une fois" (...). Essayer de tenir fermement le seau de Newton et faire tourner le ciel des étoiles fixes et vérifier l'absence de forces centrifuges.* »[3]

Cette affirmation contient l'idée que la cause des forces fictives présentes dans des systèmes de référence non inertiels peut être trouvée dans le « *ciel des étoiles fixes* » (dans le langage actuel, on dirait : *dans la distribution des galaxies dans l'univers*). Elle contient donc non seulement le refus d'un espace absolu de nature transcendante, mais aussi l'idée que la distinction locale entre systèmes inerte et accéléré peut être trouvée

via l'univers concret dans lequel nous vivons. C'est une grande idée appelée aujourd'hui « principe de Mach » lequel, mieux explicité dans le « principe d'équivalence » fut utilisé plus tard par Einstein comme une base de la théorie de la relativité générale[4]. Ainsi il y a une part fondamentalement positive dans les points de vue de Mach et ce n'est pas par hasard que l'on parle encore de lui un siècle après ; néanmoins sa philosophie contenait aussi un côté plus sombre qui se manifesta dans son refus de l'atomisme et au cours de la longue bataille contre le physicien viennois Ludwig Boltzmann. Mach déclara « métaphysique », ce qui n'est pas vérifiable expérimentalement, non seulement les conceptions théologiques de Newton, mais aussi toutes les conjectures sur la réalité matérielle dépourvues d'évidence empirique immédiate. L'histoire de la physique, et en particulier le grand développement de l'atomisme, ont montré que son point de vue antiréaliste était mal fondé : le nombre d'Avogadro a été mesuré par quinze méthodes différentes et toujours trouvé égal à la même valeur[5]. En conséquence, la philosophie de Mach a perdu beaucoup de son attrait, au point qu'aujourd'hui il est devenu difficile de trouver quelqu'un sympathisant ouvertement avec le positivisme. La situation était très différente au commencement du XXème siècle : il est bien connu que les travaux de Mach eurent un fort impact sur le jeune Einstein et que la théorie de la relativité fut formulée en tenant compte soigneusement des exigences épistémologiques du philosophe viennois.

2. Le ralentissement des horloges en mouvement

En 1881, Albert Michelson (1852-1931) publia sa première tentative pour observer, sur une figure d'interférence, un décalage dû au mouvement absolu de la Terre. Il n'observa aucun effet et en conclut que l'éther est complètement entraîné par notre planète. Cependant, le décalage théorique (déduit de le physique classique) avec lequel il compara son résultat s'est révélé être incorrect d'un facteur deux. Lorentz signala cette erreur, et la mise en évidence expérimentale s'en trouva moins décisive après correction. En 1887, Michelson lui-même et Edward Morley effectuèrent une nouvelle expérience interférométrique deux fois plus précise, confirmant l'absence d'effets dus au mouvement de la Terre. Leur interféromètre était placé sur une large dalle de pierre flottant sur du mercure[6].

Pour expliquer ces résultats, George Fitzgerald[7] et indépendamment Hendrik Lorentz[8] supposèrent que, dans l'éther, un mouvement de vitesse v provoque sur chaque corps une contraction de sa longueur ℓ égale à

$$\Delta\ell \cong -\frac{1}{2}\ell\left(\frac{v}{c}\right)^2 \quad (1)$$

dans le sens de la vitesse. Cette conjecture suffisait à expliquer le résultat négatif de l'expérience de Michelson-Morley. L'idée d'une contraction due au mouvement ne venait pas d'aussi loin qu'il semblait. En utilisant la physique classique, Lorentz réussit à prouver que le mouvement d'une charge électrique dans l'éther modifie le champ électrique qui l'entoure en l'aplatissant selon un plan perpendiculaire à la direction du mouvement, et que le degré d'aplatissement croît avec la vitesse de la charge. Il s'ensuit qu'un électron lié à un proton en mouvement ne forme plus un atome d'hydrogène régulier, mais un atome dont le mouvement interne est localisé sur une orbite aplatie comme le champ. De plus, la période du mouvement électronique est également modifiée et croît pour l'observateur de l'atome en mouvement. On doit dès lors s'attendre à ce que tout objet (constitué d'atomes) soit contracté dans sa dimension parallèle à la direction du mouvement et que toute horloge en mouvement, voit la marche de ses aiguilles ralentie. En 1895, Lorentz publia sa fameuse *Théorie des Electrons*[9] basée sur l'idée que l'éther était en repos permanent et non influencé par le mouvement des corps matériels. Dans cet article, il montra que l'idée d'une contraction universelle de *tous les corps en mouvement* d'un facteur $1 - v^2/2c^2$ (si $v \ll c$) était très raisonnable déjà en physique classique. En un certain sens, il pouvait ainsi expliquer réellement le résultat négatif de l'expérience de Michelson-Morley. Le succès de la théorie de Lorentz fit naître dans la communauté scientifique, un regain d'intérêt pour l'éther et ses propriétés.

Le premier à conclure qu'une horloge « naturelle » puisse modifier sa marche quand elle se trouve en mouvement, fut Voigt dans un article de 1887[10]. Il conclut que la période T_0 doit devenir

$$T = \frac{T_0}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

si la vitesse de l'horloge est v. La formule précédente est manifestement différente de la formule relativiste habituelle, dans laquelle apparaît une racine carrée au dénominateur.

Alors que le nouveau siècle venait tout juste de naître, Joseph Larmor[11] considéra un système « composé de deux électrons de charges opposées » (on dirait aujourd'hui composé d'une paire électron-positon) et, négligeant le rayonnement, il supposa que les deux particules décrivaient des orbites circulaires autour de leur centre de masse commun. En supposant, d'autre part, que le système était en mouvement dans l'éther, il prouva que la déformation des champs électriques, due à la vitesse, et prédite par la physique classique, donnait naissance à la contraction du système lié, postulée par Fitzgerald et Lorentz. De plus, Larmor trouva que la période orbitale T des deux charges était nécessairement augmentée de

$$\Delta T = \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} \quad (2)$$

Mais comme une telle variation peut être obtenue à partir de

$$T + \Delta T = \frac{T}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

en effectuant un développement en série de puissance de v/c, on peut dire que celle de Larmor fut la première formulation correcte de l'idée d'une dilatation des intervalles de temps en fonction de la vitesse. Les résultats de Larmor montrèrent que les ingrédients nécessaires pour expliquer les résultats négatifs des expériences destinées à mettre l'éther en évidence étaient déjà acquis en physique prérelativiste. En fait, à elle seule, la contraction de Lorentz-Fitzgerald ne suffit pas à expliquer les résultats négatifs de Kennedy et Thorndike[12] ainsi que ceux d'Ives et Stilwell[13], tandis que si on lui ajoute le ralentissement des horloges en mouvement, on peut expliquer toutes les expériences relativistes connues.

Aujourd'hui, le ralentissement des horloges en mouvement est très bien établi expérimentalement, au point que l'on peut conclure que nous avons affaire à un *phénomène de la nature*, plutôt qu'à une étrange prédiction théorique. L'une des expériences les plus précises et les plus convaincantes a été faite en 1977, quand on a mesuré les durées de vie moyennes des muons positifs et négatifs en utilisant un dispositif expérimental particulier, l'anneau de stockage des muons du CERN[14]. Des muons d'une vitesse égale à 0,9994 *c*, correspondant à un facteur γ de 29,33, circulaient sur un anneau de 14 m de diamètre, avec une accélération centripète égale à 10^{18} g. Un bon accord fut observé avec la formule relativiste

$$\tau = \frac{\tau_{rep}}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad (3)$$

où τ est la durée de vie moyenne des muons observés dans les conditions de l'expérience et τ_{rep} la durée de vie moyenne au repos et $\beta = v/c$, v étant la vitesse du muon sur l'orbite circulaire.

La leçon générale qu'il convient de tirer de cette expérience concerne la transformation du temps donnée par (3) : l'intervalle de temps Δt entre deux événements positionnés en un même lieu du système en mouvement (injection et désintégration des muons dans le présent exemple) est observé, dans le laboratoire, dilaté par le facteur relativiste usuel, quand on le compare à l'intervalle de temps correspondant Δt_0 mesuré par l'observateur du système en mouvement. On a :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad (4)$$

A côté de cette expérience, il existe de nombreuses autres preuves allant dans le même sens : des mesures effectuées sur des faisceaux rectilignes de particules instables ont montré que la durée de vie moyenne (avant leur désintégration spontanée) dépend de la vitesse, exactement comme le prévoit la formule (3). Ces expériences ont été répétées de si nombreuses fois et sont si sûres qu'il ne serait pas raisonnable de mettre en doute la conclusion que le ralentissement des horloges en mouvement est une véritable propriété de la nature et non le produit fantastique de l'imagination des physiciens.

3. Les jumeaux de Langevin

Rappelons le fameux « paradoxe des jumeaux » formulé par Langevin pour illustrer les propriétés particulières du temps prédites par la théorie de la relativité restreinte. Gardons présent à l'esprit qu'en réalité, on a affaire à plus qu'un paradoxe, qu'il s'agit d'un fait naturel établi sans aucun doute raisonnable possible. Considérons deux frères jumeaux **F** et **G**. Le premier décide de devenir spationaute et d'effectuer un voyage interstellaire, tandis que le second reste sur Terre à attendre son retour. Le départ a lieu lorsque les jumeaux sont âgés de vingt ans. Le vaisseau spatial de **F** accélère rapidement pour atteindre une vitesse égale à 99% de celle de la lumière et voyage jusqu'à son arrivée dans les parages de Mira Ceti, une étoile variable bien connue située à 32 années-lumières de nous. Il s'arrête, prend quelques clichés de ce système stellaire, puis accélère de nouveau pour retourner vers la Terre, jusqu'à atteindre de nouveau 99% de la vitesse de la lumière. Dans combien de temps sera-t-il de retour ? Le calcul est facile pour le jumeau **G**, il reviendra au bout de 64,6 ans (en négligeant le bref délai mis pour accélérer et pour freiner). La situation est différente pour **F** qui est soumis, à la fois technologiquement et biologiquement, au ralentissement de tous les processus physiques. Dans le vaisseau spatial, chaque chose est soumise à un rythme plus lent, des horloges aux ordinateurs et aux battements cardiaques des spationautes. Nous pouvons aller jusqu'à dire que le temps lui-même est ralenti d'un facteur $\sqrt{1-(0{,}99)^2} \cong 0{,}141$. Ainsi, pour le jumeau **F**, le voyage dure en réalité $64{,}6 \times 0{,}141 \cong 9$ ans. Lorsqu'à la fin du périple,. **F** retrouve **G** il est encore jeune (il a 29 ans) tandis que **G** est octogénaire.

La seule chose qui semble paradoxale dans cet argument, c'est que personne n'a jamais eu une telle expérience, mais cela est finalement naturel puisque les vitesses maximales atteintes par l'homme sont ridiculement petites comparées à celle de la lumière. Néanmoins, une expérience réelle utilisant concrètement des voyages « humains » a été faite en 1972, par Hafele et Keating[15], qui utilisèrent plusieurs horloges atomiques au césium. Toutes ces horloges ont été synchronisées avec soin et certaines d'entre elles ont été placées à bord d'avions commerciaux pour effectuer un tour complet autour de la planète. Un vol a été effectué vers l'est, l'autre vers l'ouest. Après chaque vol les horloges furent comparées à celles qui étaient restées au sol, dans le laboratoire des deux physiciens. On a pu observer que par rapport aux horloges restées au sol, le voyage vers l'ouest avait produit une perte de 59 ± 10 nanosecondes, tandis que le voyage vers l'est avait produit une avance de 273 ± 7 nanosecondes. Ces résultats étaient en accord parfait avec la théorie de la relativité. La différence de temps mesurée était expliquée essentiellement par l'asymétrie fondamentale des deux situations physiques : pour le vol vers l'est, la vitesse de l'avion devait être ajoutée à la vitesse de rotation de la Terre, tandis que pour le vol vers l'ouest, elle devait être retranchée, de sorte que, par rapport au centre de la Terre, un vol était beaucoup plus rapide que l'autre.

Il existe de nombreux travaux discutant le paradoxe des jumeaux. On peut les ranger en deux catégories : (a) Ceux reconnaissant dans la vitesse du jumeau **F** la cause du ralentissement de ses processus biologiques ; (b) Ceux qui, au lieu de cela, attribuent ce même effet à l'accélération ressentie par **F** au départ, à l'arrivée et au moment du renversement de la vitesse. Manifestement, les tenants du second point de vue essaient de sauver la symétrie parfaite entre les différents mouvements rectilignes et uniformes requis par le principe de relativité, mais leur position est impossible à sauver, comme l'a montré Builder[16]. Son argument est très simple : en physique, on peut reconnaître la cause d'un phénomène en la faisant varier et en vérifiant l'existence des variations correspondantes des effets. En bref, dans le cas des jumeaux, si **F** double la longueur des portions de trajet où le mouvement est rectiligne et uniforme en laissant inchangés les temps d'accélération, il trouvera que sa différence d'âge avec **G** a également doublé : par conséquent, c'est la vitesse et non l'accélération qui est responsable de l'asymétrie du vieillissement des deux jumeaux.

Herbert Dingle, professeur d'Histoire et de Philosophie des Sciences à

Londres durant les années 50 et au début des années 60 mena une bataille épique contre certains aspects de la théorie de la relativité, en particulier contre l'asymétrie du vieillissement dans le paradoxe des deux jumeaux. Il croyait que le ralentissement des horloges en mouvement était une pure fantaisie. On sait que cette idée a été réfutée par la suite par les mises en évidence expérimentales directes. Néanmoins, son travail nous laisse un joyau assez rare, le syllogisme qui porte son nom. Comme le syllogisme est le modèle technique même d'une déduction parfaite, ses conclusions devraient s'imposer nécessairement.

Le syllogisme de Dingle, dans sa formulation originelle[17], est le suivant :

1. (*Prémisse principale*) Selon le postulat de relativité, si deux corps (par exemple deux horloges identiques) sont séparées puis réunies, il n'existe aucun phénomène observable susceptible de montrer, au sens absolu, laquelle des deux a été mise en mouvement.

2. (*Prémisse mineure*) Si, après réunion, une horloge a été retardée d'une quantité dépendant de leur mouvement relatif et pas l'autre, ce phénomène montrerait que c'est la première qui a été mise en mouvement et pas la seconde.

3. (*Conclusion*) En conséquence, si le postulat de relativité est vrai, les horloges doivent être également retardées ou bien pas retardées du tout : dans chacun des cas, leurs lectures doivent être en accord après réunion, si cet accord existait déjà au moment de la séparation.

Aujourd'hui, on sait que le comportement asymétrique des deux horloges est expérimentalement certain (muons dans les rayons cosmiques, expérience du CERN avec l'anneau de stockage des muons, expériences avec des faisceaux de particules instables, expérience de Hafele et Keating). Il en résulte, comme conséquence du point **3.** précédent, que le postulat de relativité doit être nié, d'une manière ou d'une autre. En fait, actuellement, il semble que le milieu scientifique penche pour que l'expression « Théorie de la Relativité » ne soit pas prise au pied de la lettre. Le relativisme total que la théorie semble assumer n'est qu'une illusion. En conclusion, tout n'est pas relatif dans la théorie de la relativité : elle contient aussi une part d'absolu ! Comme Dingle écrivit : « *Il est évident que s'il existe un effet absolu fonction de la vitesse, alors la vitesse doit être absolue. Nulle manipulation de formules, nul montage d'expérience ne saurait altérer ce simple fait* »[17].

4. Lorentz et les effets de l'éther

Einstein fut le premier à conclure que *toutes les horloges en mouvement* doivent ralentir conformément à l'équation (4) : ceci était l'une des conséquences de la théorie de la relativité restreinte. Son point de vue de 1905 était à peu près le suivant : l'éther n'existe pas, il n'y a donc aucun sens à considérer un mouvement par rapport à rien. Le décrire par rapport à des objets concrets seul a un sens. La contraction des règles ou le ralentissement des horloges sont toujours relatifs à des observateurs qui les voient en mouvement, et une symétrie (parfaite physique et philosophique) existe entre les différents observateurs inertiels. Considérons une règle en mouvement par rapport à différents observateurs inertiels $O_1, O_2, ..., O_n$ qui la voient se mouvoir avec les vitesses respectives $v_1, v_2, ..., v_n$, sa longueur est, pour ces observateurs, raccourcie d'un facteur respectivement égal à

$$\sqrt{1-v_1^2/c^2}, \sqrt{1-v_2^2/c^2}, ..., \sqrt{1-v_n^2/c^2}$$

Une question légitime se pose alors : « Qu'arrive-t-il réellement à la règle, quelle est sa vraie longueur ? » .La réponse relativiste est que la question elle-même n'a pas de sens et que tous les points de vue des différents observateurs sont également, même si ce n'est que partiellement, valables. De cette manière, la philosophie du relativisme et du subjectivisme devient dominante en physique aux yeux des observateurs inertiels.

Paul Ehrenfest ressentit fortement l'existence de cette sorte de problèmes. La théorie de la relativité restreinte, basée sur la négation de l'éther, requiert une complète équivalence des observateurs en mouvement relatif rectiligne et uniforme, puisqu'il n'y a aucune raison qu'ils ne le soient pas, étant donné qu'ils se meuvent par rapport à rien. Néanmoins, si l'on adopte le principe

Albert Einstein en 1905. A cette époque, son opinion était que l'éther n'existe pas et qu'il n'y a donc aucun sens à considérer un mouvement par rapport à rien. Toutefois, après 1920, suite à l'impact de sa propre formulation du principe d'équivalence, il changea d'avis.

d'équivalence, qu'Einstein formula en 1916, l'inertie a son origine dans les effets gravitationnels de masses distantes, effets ayant pour support les champs physiques présents dans l'espace vide. Mais le mot « éther » et le mot « champ » signifient plus ou moins la même chose, c'est-à-dire un vide pourvu de propriétés physiques. Cette contradiction tracassait Ehrenfest qui écrivit à Einstein, en 1919 : « *Désormais on ne peut plus dire qu'ils se meuvent par rapport à rien puisqu'ils se meuvent par rapport à quelque chose d'énorme !... Einstein, mon estomac détraqué exècre votre théorie — il en vient presque à vous exécrer vous-même ! Que dire à mes étudiants ? Que répondre aux philosophes ?* »[18]

On peut certainement être d'accord avec Ehrenfest que le ralentissement de la marche des horloges est complètement incompréhensible (excepté comme un phénomène purement apparent et essentiellement irréel — mais l'expérience du muon est là pour montrer qu'il n'en est pas ainsi) s'il n'y a pas de milieu concret

produisant le ralentissement lui-même.

Il est certain qu'à son point de départ, la théorie de la relativité n'a guère convaincu qu'une minorité qu'il fallait éliminer l'éther. Nous avons vu, Einstein lui-même changea d'avis après 1920, peut-être sous l'influence d'Ehrenfest, après l'impact de sa propre formulation du principe d'équivalence. Par ailleurs, Poincaré continua d'écrire sur l'éther, par exemple dans une conférence intitulée *Les rapports de la matière et de l'éther*[19], donnée en 1912 à la Société Française de Physique.

Lorentz également continua à travailler sur une ligne de pensée favorable à l'éther. En 1909, il publia un livre dans lequel il formula différemment la théorie relativiste. Une fois de plus, l'idée était de partir de quelques implications importantes, mais particulières, de la physique classique et d'en étendre la validité. Lorentz fit trois hypothèses :

1. Toute règle en mouvement par rapport à l'éther, avec une vitesse v, est raccourcie d'un facteur $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ dans le sens de sa longueur ;

2. Toute horloge en mouvement par rapport à l'éther avec une vitesse v voit sa marche ralentie d'un facteur $\sqrt{1 - v^2/c^2}$.

3. La convention d'Einstein pour synchroniser les horloges est valable, et la vitesse de la lumière peut être supposée égale à c dans toutes les directions et dans tous les systèmes de référence inertiels.

On doit aussi se rappeler que Lorentz concevait d'une façon plutôt asymétrique la contraction des corps en mouvement (qu'il considérait comme étant un phénomène physique réel) et le ralentissement des horloges en mouvement (qu'il assimilait seulement à une convention commode). Il appelait *« temps local »*, le temps qui figurait dans sa transformation, mais seulement *« en vue de faciliter la façon de s'exprimer »*.

Les trois hypothèses précédentes lui permettaient de développer une théorie formellement équivalente à celle de la relativité restreinte, mais elle reposait sur l'idée que l'éther existe : d'un point de vue philosophique, la différence est assez importante, même si le système de référence privilégié, supposé exister dès le départ, perd toute sa particularité dans le formalisme, en se noyant pour ainsi dire, dans l'ensemble des autres systèmes de référence. Voici comment Lorentz décrivait la situation : *« Son résultat* (celui d'Einstein) *concernant les phénomènes électromagnétiques et optiques (...) sont pour l'essentiel en accord avec ceux que nous avons obtenus dans les pages précédentes, la différence capitale étant qu'Einstein postule tout simplement ce que nous avons déduit avec quelque difficulté et de manière non complètement satisfaisante, des équations fondamentales du champ électromagnétique. Ce faisant, il peut certainement s'attribuer le mérite de nous faire voir, dans le résultat négatif des expériences telles que celles de Michelson, Rayleigh et Brace, non pas une compensation fortuite d'effets opposés, mais la manifestation d'un principe général et fondamental.*

« Toutefois, je pense que quelque chose peut être avancé en faveur de la forme que nous avons donnée à notre théorie. Je ne peux que considérer que l'éther, siège d'un champ électromagnétique avec son énergie et ses vibrations, même s'il diffère de toute matière ordinaire, doit être doté d'un certain degré de substantialité. Dans cet ordre d'idée, il semble naturel de ne pas supposer dès le départ que l'on ne puisse jamais faire de différence entre un corps se déplaçant ou non dans l'éther, et de mesurer des distances et des durées au moyen de règles et d'horloges ayant une position fixée par rapport à l'éther. »[20]

Etant donné qu'il est impossible de distinguer expérimentalement la formulation de Lorentz de celle d'Einstein, les différences conceptuelles semblent être métaphysiques. En principe, chaque physicien pourrait choisir la formulation qu'il préfère ; en pratique, la grande diffusion des idéologies négatives dans la culture européenne dans les années 20 et 30 a fortement favorisé l'acceptation du relativisme d'Einstein. D'autre part, la structure même de la théorie lorentzienne fut facilement critiquée par les physiciens d'inclination antiréaliste. Ainsi, Heisenberg écrivait : *« Etant donné que tous les systèmes de référence qui subissent un mouvement de translation uniforme les uns par rapport aux autres sont équivalents pour décrire ce qui se passe dans la Nature, le postulat selon lequel il existait une substance, l'éther, immobile par rapport à un seul de ces systèmes, n'avait pas de sens. »*[21]

Ce fut essentiellement la diffusion des idées de l'école de Copenhague sur la formulation de la mécanique quantique, à partir du milieu des années 20, qui conduisit la large majorité des physiciens à s'accorder philosophiquement sur des positions de base idéalistes. Dans pareil contexte, l'abandon de l'éther et l'acceptation du relativisme subjectiviste devint durablement la mode en faveur au XXème siècle.

5. La synchronisation des horloges en relativité

*« Même s'il apparaissait que le monde des idées ne peut se déduire de l'expérience par des moyens logiques, et qu'il est en un certain sens, une création de l'esprit humain sans lequel aucune science n'est possible, néanmoins ce monde des idées est aussi peu indépendant de notre expérience que les vêtements le sont de la forme du corps humain. C'est particulièrement vrai de nos concepts de temps et d'espace, que les physiciens ont été obligés, sous la pression des faits, de faire descendre de l'Olympe de l'*a priori *pour les adapter et les mettre en état de servir. »*[22]

Cette présentation de la bataille d'Einstein contre les notions d'espace et de temps absolus de la physique newtonienne peut être largement acceptée. Cependant, le temps de la relativité ne représente pas la concrétisation entière de cette conception générale. En fait, le point crucial de la théorie de la relativité restreinte de 1905 était le rejet de l'éther sous l'influence bien connue de Mach. Récemment, on a découvert qu'Einstein changea d'opinion et déclara être favorable à un espace doté de propriétés physiques et qu'il rebaptisa plusieurs fois « éther »[23]. Cependant, c'est sa position initiale qui devint la mieux connue, grâce au soutien apporté par les représentants des écoles de Copenhague et de Göttingen à toutes les conceptions antiréalistes importantes de la physique moderne. C'est pour cette raison, qu'aujourd'hui, la majorité des physiciens actifs croît que la physique, grâce à la théorie de la relativité, est parvenue à liquider définitivement l'idée que le vide est rempli par un éther transmettant les ondes électromagnétiques. Comme nous verrons plus loin, l'absence de la notion d'éther a d'importantes conséquences négatives sur notre possibilité de comprendre rationnellement le mon-

de physique et notamment la nature du temps.

Selon Holton, la théorie de la relativité aurait simplement déplacé le foyer de l'espace-temps du sensorium du Dieu de Newton au sensorium du « Gedanken » - experimentateur abstrait d'Einstein, en réalisant ainsi la sécularisation complète de la physique[24]. En fait, avec l'utilisation exclusive des conceptions opérationnelles, Einstein réduisit le temps et l'espace à leurs procédés de mesure au moyen d'horloges et de règles[25]. Le temps de la relativité est devenu dépendant du nouveau concept de « simultanéité » : pour cette raison, il est considéré comme dénué de sens de parler de l'ordre temporel de deux événements sans préciser dans quel système de référence leurs coordonnées de temps sont mesurées.

La célèbre méthode proposée par Einstein pour synchroniser les horloges (basée sur l'invariance supposée de la vitesse de la lumière) est non seulement compatible avec le principe de relativité, mais peut être considérée comme sa conséquence la plus immédiate. Il en est ainsi parce que les équations de Maxwell à l'extérieur des charges électriques impliquent la validité de l'équation de d'Alembert pour les champs, laquelle décrit la propagation d'ondes électromagnétiques ayant une vitesse constante c indépendante de l'état de mouvement de la source. Si l'on considère les équations de Maxwell comme valables dans chaque système de référence inertiel, comme l'exige le principe de relativité, la valeur numérique de la vitesse de la lumière doit demeurée la même. Néanmoins, Einstein sentit la nécessité de postuler à part l'invariance de la vitesse de la lumière, parce que son travail de 1905 sur les interactions des ondes électromagnétiques l'avait convaincu de l'existence de corpuscules de lumière et donc de la valeur limitée des équations de Maxwell décrivant seulement des propagations continues. D'autre part, il montra en diverses occasions que la nature conventionnelle du postulat d'invariance était très clair dans son esprit, par exemple en 1916, quand il écrivit à propos d'un point M se trouvant au milieu d'un segment de droite AB dont les extrémités sont atteintes « simultanément » par deux éclairs : « *Que la lumière mette le même temps à parcourir le trajet AM (...) que le trajet BM (M étant le milieu de la ligne AB) n'est en réalité* ni une supposition ni une hypothèse *sur la nature physique de la lumière, mais une* clause *que j'admets de mon plein gré.* »[26]

Ce fut essentiellement la diffusion des idées de l'école de Copenhague sur la formulation de la mécanique quantique, à partir du milieu des années 20, qui conduisit à l'abandon de l'éther et à l'acceptation du relativisme subjectiviste au XXème siècle.

D'autre part, bien avant la formulation de la théorie de la relativité (en 1896), Poincaré discuta l'indépendance de la vitesse de la lumière de sa direction de propagation et conclut : « *C'est un postulat sans lequel il serait impossible d'envisager une mesure quelconque de cette vitesse. Il sera toujours impossible de vérifier expérimentalement ce postulat.* »[27]

La simultanéité relativiste dépend fortement du procédé de synchronisation qui est considéré comme arbitraire. Considérons les coordonnées d'espace x, y, z et de temps t dans un système inertiel S. La définition opérationnelle de la simultanéité de deux horloges distantes l'une de l'autre au repos dans le même système inertiel contiendrait une grande part d'arbitraire, d'un point de vue généralement accepté. La méthode qui vient à l'esprit de chacun ne marche pas : synchroniser les horloges quand elles sont proches et les amener aux points où elles doivent se trouver. Cela ne marche pas, parce que maintenant, il apparaît clairement que le transport, qui se fait nécessairement avec une vitesse, modifie le mouvement des aiguilles des horloges, de même qu'il modifierait n'importe quel mouvement périodique utilisé pour mesurer le temps. Le transport d'une horloge peut être effectué en un temps court avec une grande vitesse ou en un temps long avec une vitesse très faible, mais il existe toujours un délai fini inévitable engendré par le déplacement de l'horloge. Beaucoup en ont conclu , étant donnée la situation, que la « synchronisation » pouvait être faite arbitrairement, en usant de critères quelconques pourvu qu'ils conduisent à une identification non ambiguë des événements. En général, on peut penser que le temps est différent dans deux systèmes de référence inertiels $S(x, y, z, t)$ et $S'(x', y', z', t')$ et que le « délai » $t' - t$ (qui peut être *a priori* positif, nul ou négatif) dépend non seulement du temps t, mais aussi du point où t' est mesuré. Nous écrirons donc

$$t' = \eta(x', y', z', t) \qquad (5)$$

En d'autres termes, le temps t' indiqué par une horloge T' de S' peut différer du temps t indiqué par l'horloge T de S qui passe près d'elle, d'une quantité dépendant non seulement de t mais aussi du point où T' est placée. En fait η (qui est la « fonction de synchronisation ») informe sur la façon dont t' dépend, non seulement de t, mais aussi du point de coordonnées x', y', z' du système S'. Étant donné une fonction de plusieurs variables, en général, il suffit de faire varier certaines d'entre elles pour que la valeur de la fonction change. Considérons alors deux événements simultanés dans S (t identique), mais situés en des points (x', y', z' différents), l'équation (5) entraîne qu'en général, ces événements ne sont plus simultanés dans S'. C'est cela et rien d'autre qui constitue la relativité de la simultanéité !

Reichenbach dans son livre *The Philosophy of Space & Time* considéra la situation suivante : dans un système inertiel S un éclair lumineux est émis d'un point A à l'instant t_1, est réfléchi en un point B à l'instant t_2 et revient en A à l'instant t_3. Le problème consiste à synchroniser l'horloge liée au point B avec l'horloge liée au point A. En théorie de la relativité, on *suppose* que la vitesse à l'aller (de A

vers B) est la même qu'au retour (de B vers A), autrement dit, on pose

$$t_3 - t_2 = t_2 - t_1$$

d'où l'on tire que le temps t_2 marqué par l'horloge B, peut s'exprimer en fonction des temps t_1 et t_3 marqués par l'horloge A au moyen de la simple formule

$$t_2 = t_1 + 1/2(t_3 - t_1) \qquad (6)$$

Reichenbach ajouta le commentaire suivant : « *Cette définition est essentielle pour la théorie de la relativité restreinte, mais elle n'est pas epistémologiquement nécessaire. Une formule arbitraire de la forme*

$$t_2 = t_1 + \varepsilon(t_3 - t_1) \qquad 0<\varepsilon<1$$

est tout aussi valable et on ne peut prouver qu'elle soit fausse. En théorie de la relativité restreinte, on préfère la première définition, c'est-à-dire $\varepsilon = 1/2$ *et on le fait parce que cette définition conduit à des relations plus simples.* »[29]

En 1979, Jammer, discutant le coefficient ε de Reichenbach, fit remarquer que « *l'une des idées les plus fondamentales sous-jacente à l'édifice conceptuel de la relativité, comme l'ont souvent fait remarquer Hans Reichenbach et Adolf Grünbaum, est le caractère conventionnel de la définition donnée à la simultanéité à distance.* » Plus loin, il ajoute : « *La thèse du "caractère conventionnel de la simultanéité à distance" ou plus brièvement la "thèse de la conventionalité" consiste à affirmer que* ε *n'est pas forcément égal à* 1/2, *mais à un nombre quelconque de l'intervalle compris entre* 0 *et* 1, *c'est-à-dire* $0<\varepsilon<1$, *sans que cela conduise au moindre conflit avec l'expérience.* »[30]

Les différentes valeurs de ε correspondent à des valeurs différentes de la vitesse de la lumière sur un trajet simple (la vitesse sur un trajet aller-retour peut être mesuré avec une seule horloge et ne pose aucun problème de synchronisation). Par conséquent, la liberté du choix du paramètre ε impliquerait une liberté correspondante pour la vitesse de la lumière !

A tout cela, on pourrait répondre que si une assertion scientifique est vraie, elle ne peut être rejetée, mais si elle est seulement conventionnelle, il importe d'en considérer les variantes reposant sur une convention différente de celle couramment admise. En particulier, si la constance de la vitesse de la lumière est conventionnelle, il est manifestement légitime d'étudier des théories dans lesquelles cette constance cesse d'exister. Mais ce faisant, du même coup, le principe de relativité se trouve à son tour violé. Ceci signifie seulement que le principe de relativité lui-même n'est qu'une convention humaine commode et non un fait de nature : une « vérité » conventionnelle, comme l'invariance de la vitesse de la lumière, ne peut pas être une conséquence du principe de relativité, si cela est une vérité objective ! Des prémisses objectives ne peuvent conduire qu'à des conséquences également objectives.

6. Einstein-Parménide et la réalité du futur

La théorie de la relativité conduit à des conséquences particulières lorsqu'elle est utilisée pour comprendre la description de la réalité objective. Pour commencer, *comme on voit*, on ne peut pas parler du réel au présent, parce qu'en regardant des objets distincts, on ne peut pas les voir tels qu'ils sont actuellement, mais tels qu'ils étaient au moment où la lumière qui entre dans nos instruments d'observation les a quittés. De même, il n'est pas raisonnable d'attribuer une réalité au futur, parce que le sens commun nous avertit qu'il n'existe pas encore et qu'il est au moins partiellement indéterminé. Pour ces raisons, une définition raisonnable semble être la suivante : *tout ce qui existe maintenant, ici et ailleurs.* Un choix différent conduirait à définir comme réelles, ou bien les choses qui n'existe plus, ou bien des choses qui n'existent pas encore. La lumière émise par une galaxie peut mettre des centaines de millions d'années pour atteindre nos instruments, et durant cette longue durée, l'objet qui l'a émise peut avoir disparu ou être entré en collision avec un autre objet cosmique ou avoir explosé (il existe des clichés de galaxies détruites par de colossales explosions). En somme, il aura évolué et pourra *actuellement* différer de façon significative de ce qui est observé.

Adoptons la description relativiste, avec un diagramme de Minkowski dans lequel l'espace est porté en abscisse (l'espace est à une dimension, par commodité graphique) et le temps en ordonnée (Figure 1). A l'instant $t = 0$ un observateur U_0, situé à l'origine d'un système inertiel S, doit considérer, jusqu'au moindre détail, tous les événements de l'espace comme étant objectivement réels. Dans ce diagramme, l'espace est représenté par l'axe x dont l'équation est $t = 0$ et qui, par conséquent porte, tous les événements simultanés avec la présence instantanée de U_0 à l'origine au temps $t = 0$.

Si l'on considère un autre système de référence inertiel S', ses axes x' et t' sont représentés sur le diagramme de Minkowski comme des droites dans le plan (x, ct) en raison de la linéarité des transformations de Lorentz. L'observateur U'_0 au repos dans S' devra considérer comme réels tous les événements simultanés avec sa présence instantanée à l'origine à l'instant $t' = 0$. Ces événements sont donc différents de ceux qui constituent la réalité de l'observateur U_0. Conformément au principe de relativité, la question de savoir lequel des deux observateurs a raison n'a aucun sens et, étant donné la complète équivalence des systèmes inertiels, ils doivent avoir raison tous les deux. Ainsi, tous les événements portés par l'axe x' dont l'équation est $t' = 0$ et dont la pente dépend de la vitesse relative de S et de S', peuvent être considérés comme réels au même titre que ceux portés par l'axe x. La ligne de réalité de l'observateur U'_0 a une inclinaison dans le temps par rapport à celle de l'observateur U_0 et passe par l'origine du diagramme de Minkowski (Figure 1). Il est clair que l'observateur U'_0 attribuera une réalité aux événements situés dans le futur de l'observateur U_0 et qui, par conséquent, ne font pas partie de la réalité de U_0. Cependant, dans l'exemple précédent, ces événements futurs sont ailleurs et n'appartiennent pas au futur individuel de U'_0 qui est supposé au repos à l'origine $x = 0$.

Le sens de l'argument donné peut facilement se comprendre en supposant que dans S il existe différents observateurs $U_1, U_2, \ldots, U_n, \ldots$ situés en des points différents $x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots$ de l'axe x, auxquels sont attachées des horloges synchronisées selon le procédé d'Einstein. Ces observateurs sont tous équivalents lorsqu'ils décrivent la réalité, puisque l'instant $t = 0$ est le même pour tous, et que la réalité est constituée de tous les événements

portés par l'axe x ; évidemment ils sont aussi équivalents à l'observateur U_0 considéré précédemment et situé en $x = 0$. Il devient alors évident que la ligne de réalité de U'_0 passe par le futur individuel des observateurs au repos dans S [ceux qui sont situés en des points ayant des x positifs (négatifs) si S' se meut dans une direction $+x$ $(-x)$]. Cela revient à attribuer une réalité au futur individuel des observateurs de S, par exemple au futur de U_1.

Jusqu'ici, la réalité n'a été établie qu'à un seul instant de la réalité future, mais l'argument peut être facilement généralisé. En effet, une infinité de lignes de réalité passent par chaque point situé au-dessus de l'axe du diagramme *(x, ct)*, chacune de ces lignes représentant la réalité (relativiste) d'un observateur inertiel admissible. La seule restriction est que la pente de ces lignes de réalité dans un diagramme *(x, ct)* n'excède pas 45°, étant donné que toutes les vitesses considérées sont subliminales. Néanmoins, le passé, le présent et le futur sont complètement réels, ce qui est préétabli dans le plus petit détail. En passant de deux à quatre dimensions, on peut conclure que tout l'espace-temps est réel, en dépit des différentes perceptions que les hommes en ont. En d'autres termes, mon futur serait réel, c'est-à-dire fixé dans les moindres détails, malgré qu'il m'apparaisse largement indéterminé, informe et présentement irréel.

Ainsi la relativité conduit à une conception très étrange de l'univers qui englobe le passé, le présent et l'avenir dans une seule réalité : à l'instant où j'existe, d'autres observateurs tout aussi pertinents que moi, considèrent mon futur personnel comme donné dans tous ses détails. D'après eux, il n'y a pas la moindre liberté dont je puisse faire usage pour influencer le cours des événements. L'impression que je peux avoir d'une réalité évoluant parfois aléatoirement (c'est-à-dire en un sens non déterministe) serait alors entièrement subjective, limitée par la faiblesse de mes moyens d'observation, et se réduirait à une section à temps fixé de la réalité complète quadridimensionnelle. La relativité conduit donc à l'acceptation d'un univers hyperdéterministe dans lequel le futur tout entier est complètement préétabli dans ses plus infimes détails et dans lequel toute les impressions de liberté individuelle (même dans une situation aussi simple que celle de choisir de tenir ou de laisser tomber une pierre) est une pure illusion.

L'argument précédent est basé sur l'idée que chaque observateur est fondé de considérer comme réel tout ce qui existe autour de lui ici et ailleurs à l'instant précis où *lui-même* existe. Il existe une autre possibilité compatible avec le relativisme, basée sur l'idée que tous les observateurs ont tort et qu'il n'existe aucune réalité en dehors des sujets pensants. Dans ce cas, le plan *(x, ct)* deviendrait une *tabula rasa* où rien n'existe plus et la philosophie correspondante ne serait plus que l'idéalisme à l'état pur. Une telle « solution » est manifestement moins intéressante encore que la précédente. Il semble donc impossible d'échapper au dilemme hyperdéterminisme-idéalisme sans abandonner le principe de relativité.

Dans son autobiographie, Karl Popper se montre critique envers l'hyperdéterminisme. Rappelant une discussion qu'il eût avec Einstein à Princeton en 1950, il écrit : « *Je tentai de le persuader qu'il devait abandonner le déterminisme par lequel sa vision du monde se réduisait à celle d'un univers Parménidien ; un univers où le changement était une illusion humaine, ou peu s'en fallait. (Il admit que telle avait été sa vision du monde, et pendant notre discussion je l'appelai "Parménide").* »[31]

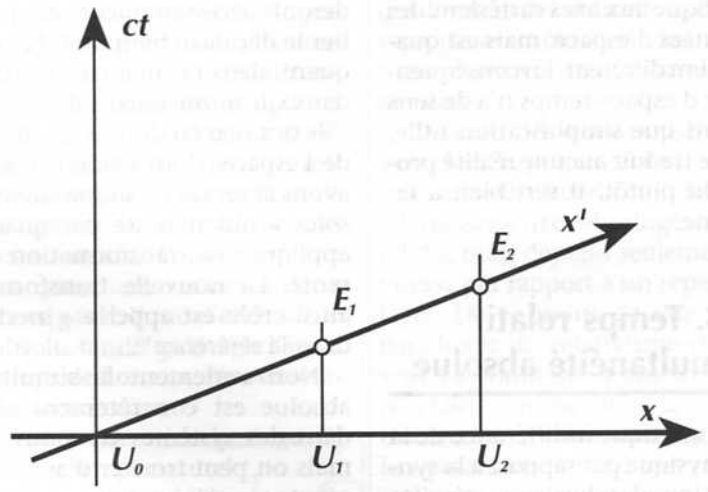
L'identification faite par Popper est justifiée puisqu'aussi bien pour Einstein que pour Parménide, l'impression subjective de l'évolution est une pure apparence. Popper trouva inacceptable cette description de la réalité et il est bien difficile de ne pas être d'accord avec lui. Il est clair que nous devons éliminer le responsable de l'hyperdéterminisme : le relativisme.

7. La flèche du temps

Une sérieuse attaque contre la nature physique du temps fut porté par Minkowski. Dans une conférence qu'il fit à Cologne en 1908 il affirma : « *La vision de l'espace et du temps que je souhaite vous exposer a germé sur le sol de la physique expérimentale d'où elle puise sa force. Elle est radicale. Désormais l'espace en soi, le temps en soi, sont déclarés relégués au royaume des ombres, et seule, une sorte d'union des deux pourra préserver une réalité indépendante.* »[32]

A côté de son continuum espace-temps quadridimensionnel, Minkowski introduisit également une

Figure 1



Dans un diagramme de Minkowski la ligne de réalité d'un observateur en mouvement est l'axe x' qui porte des événements tels que E_1, E_2,... appartenant au futur des observateurs U_1, U_2,... placés sur l'axe de l'observateur « stationnaire » U_0.

nouvelle relation temporelle avec l'événement présent, qui vient s'ajouter aux relations classiques de « passé » et de « futur », en introduisant un « ailleurs » qui est l'ensemble de tous les événements qui ne peuvent pas être reliés causalement à l'événement présent, parce qu'ils sont à l'extérieur de son cône de lumière. La nécessité de ce concept nouveau, et sans aucun doute utile, provient de la nature de l'insurmontable limite de la vitesse de la lumière. Néanmoins, la réduction du temps à un axe cartésien de l'espace à quatre dimensions suggère aussi fortement sa réversibilité (étant donné que sur chaque axe spatial la direction « positive » est purement conventionnelle), entraînant un effacement possible de la distinction entre passé et futur. C'est un point de vue que de nombreux physiciens ont récemment développé, jusqu'aux « expériences à choix différé » de Wheeler[33]. Un des arguments utilisé encore aujourd'hui en faveur d'une symétrie entre le passé et le futur est l'idée de Feynman qu'une antiparticule « doit » être considérée comme une particule ordinaire se propageant en remontant le cours du temps[34]. Ainsi, un positon serait un électron voyageant du futur vers le passé. Cette opinion ne peut être défendue que si l'on oublie les circonstances concrètes de la découverte du positon. En effet, Alvarez en compte l'histoire avec une clarté remarquable : « *Rappelons un point crucial de la découverte du positon. De nombreux physiciens diraient que la découverte du positon résulta de l'observation, dans une chambre à brouillard plongée dans un champ magnétique, de la trajectoire d'un électron courbée dans le mauvais sens. Mais ce ne serait pas correct, car dans ces chambres à brouillard, d'autres physiciens avaient déjà vu des trajectoires d'électrons courbées dans le mauvais sens. Ainsi Skobeltzyn (le premier a avoir construit une chambre à brouillard pourvue d'un champ magnétique) commenta l'étrange comportement des électrons qui, à l'occasion, étaient diffusés à presque 180° ! (Rétrospectivement, on comprend qu'il avait observé une production de paires, électron-positon, mais il crut que le positon était un électron ayant une direction opposée). La grande découverte du positon par Anderson reposa entièrement sur le fait qu'il reconnut la direction dans lequel le positon allait ; pour cela, il disposa une feuille de plomb dans sa chambre à brouillard et observa la perte d'énergie et la trajectoire s'incurver davantage après que la particule eût traversé la feuille de plomb. De nombreux observateurs avaient vu des particules qui étaient* en accord *avec l'hypothèse du positon, mais Anderson fut le premier à être en mesure de* rejeter *les autres interprétations. C'est pourquoi il est reconnu comme ayant découvert le positon.* » [35]

Ce récit montre bien qu'un positon *n'est pas* un électron normal se propageant en remontant le cours du temps. S'il en était ainsi, l'expérience d'Anderson nous aurait informés que l'électron acquiert de l'énergie en traversant la feuille de plomb (au lieu d'en perdre, comme il arrive à toutes les particules connues). Cependant, étant donné la complexité des interactions avec les nombreux atomes de la feuille de plomb, la probabilité d'un tel gain est extrêmement faible et son observation systématique contredirait les lois statistiques et thermodynamiques que nous connaissons. Ayant surmonté cet élément de confusion, on peut conclure que chaque phénomène connu implique la propagation de matière et/ou d'énergie du passé vers le futur et *jamais dans une direction opposée du temps*. C'est dans ce sens que l'on peut dire qu'il existe une flèche du temps.

La conclusion de cette section est que le temps de la nature coule toujours du passé vers le futur. L'apparente réversibilité n'est qu'une simplification théorique. Le temps n'est pas identique aux axes cartésiens des coordonnées d'espace, mais est qualitativement différent. En conséquence, parler d'espace-temps n'a de sens qu'en tant que simplification utile, mais il ne traduit aucune réalité profonde. Ou plutôt, il sert bien à en cacher une.

8. Temps relatif et simultanéité absolue

L'hypothétique indifférence de la réalité physique par rapport à la synchronisation des horloges n'existe que dans la mesure où l'on néglige les accélérations. En fait, quand un corps est accéléré, on peut le considérer au repos dans différents systèmes inertiels durant des intervalles de temps infiniment petits, et il est alors impossible d'adopter dans ces systèmes un procédé tel que celui d'Einstein qui requiert un temps fini pour synchroniser des horloges placées en des points différents. Néanmoins, les événements physiques y prennent place et une synchronisation doit d'une manière ou d'une autre être fixée par la nature. Nous allons voir maintenant comment cela se produit[36].

Deux vaisseaux spatiaux **A** et **B** sont initialement au repos sur l'axe x_0 d'un système inertiel (privilégié) S_0, à une distance d_0 l'un de l'autre. Leurs horloges sont synchronisées avec celle de S_0. A l'instant $t = 0$ ils partent en accélérant dans la direction $+x_0$ et parcourent exactement le même chemin, de telle sorte qu'ils ont la même vitesse $v(t_0)$ à chaque instant t_0 de S_0, jusqu'à un instant commun $t_0 = \overline{t_0}$ de S_0 où ils atteignent une vitesse $v = v(\overline{t_0})$ fixée à l'avance et parallèle à $+x_0$. Pour tous $t_0 \geq \overline{t_0}$, les vaisseaux spatiaux sont supposés au repos dans le système inertiel S constitué par les vaisseaux eux-mêmes se déplaçant à la vitesse v.

Il est facile de montrer que les transformations reliant S_0 et S ne peuvent pas être de Lorentz, si aucune synchronisation d'horloge n'est appliquée pour corriger ce que la nature elle-même engendre durant l'accélération des deux vaisseaux. Puisque **A** et **B** accélèrent exactement de la même manière, leurs horloges enregistreront exactement le même décalage temporel par rapport à celles demeurées au repos dans S_0 : le mouvement est le même pour **A** et **B** et tous les effets du mouvement coïncideront nécessairement, en particulier le décalage temporel. Par conséquent, deux événements simultanés dans S_0 le seront encore dans S, même s'ils ont lieu en des points différents de l'espace. Il est évident que nous avons là un cas de simultanéité « absolue » qui n'existe pas quand on applique une transformation de Lorentz. La nouvelle transformation ainsi créée est appelée « inertielle » dans la référence[36].

Non seulement la simultanéité absolue est concrètement réalisée dans des systèmes en mouvement, mais on peut trouver d'autres arguments convaincants montrant qu'elle donne la description la plus naturelle de la réalité physique. Nous supposerons que nos vaisseaux spatiaux ont des passagers P_A et P_B qui sont des jumeaux. Donc, en principe, rien ne peut les empêcher de re-synchroniser leurs horloges une fois leur accé-

lération terminée et les deux vaisseaux spatiaux sont au repos dans S. Cependant, s'ils font ainsi, ils trouveront en général qu'ils ont deux âges biologiques *différents* au même temps de S (re-synchronisé), même s'ils ont commencé leur voyage spatial au même instant de S_0 et avec la même vitesse, comme il a été stipulé plus haut. Au contraire, tout est régulier s'ils ne font pas de modification asymétrique du temps marqué par leurs horloges.

Nous avons vu que les horloges de **A** et **B** sont retardées de la même façon et que la transformation S - S_0 ne peut pas être une transformation de Lorentz. Naturellement, le vieillissement des jumeaux dans **A** et **B** doit être le même, étant donné qu'ils subissent des actions physiques (vitesses, accélérations) identiques. Par conséquent, les jumeaux ont le même âge biologique quand les temps marqués par leurs horloges sont les mêmes, si elles ont été synchronisées dans S_0 avant le départ et jamais re-synchronisées depuis. Ils peuvent donc s'informer mutuellement de leurs âges en échangeant des images (via téléfax, ou par des méthodes analogues) sur lesquelles le temps du flash est enregistré : le jumeau récepteur vérifiera sur son enregistrement qu'au temps indiqué sur l'image de son frère, il était exactement pareil à lui et que, par conséquent, il avait le même âge biologique.

Naturellement, les jumeaux P_A et P_B peuvent utiliser une synchronisation différente de leurs horloges, s'ils le désirent, par exemple, une synchronisation d'Einstein qui conduit à la validité des transformations de Lorentz entre S et S_0. Pour ce faire, ils doivent envoyer un signal lumineux, par exemple de **A** vers **B**, et ils doivent remettre à l'heure l'une des horloges au moins. On peut même supposer que chacun d'eux a deux horloges et garde l'une d'elles sur le temps absolu, tandis qu'il règle l'autre sur le temps de Lorentz. Plus exactement, supposons que :

- P_A a une première horloge T_A marquant le temps naturel t_A
- P_A a une seconde horloge $\hat{T}_A$ marquant le temps d'Einstein $\hat{t}_A$
- P_B a une première horloge T_B marquant le temps naturel t_B
- P_B a une seconde horloge $\hat{T}_B$ marquant le temps d'Einstein $\hat{t}_B$

Après un délai initial durant lequel $t_A = \hat{t}_A = t_B = \hat{t}_B$, on re-synchronise $\hat{T}_B$ comme suit. A un moment donné fixé à l'avance, un signal lumineux est envoyé de **A** vers **B**. La convention que la vitesse de la lumière dans S est égale à c dans toutes les directions (synchronisation d'Einstein) oblige l'observateur en **B** à déplacer les aiguilles de son horloge $\hat{T}_B$ d'une façon telle que le temps mis par la lumière pour parcourir la distance **A** - **B** soit $d = x_A - x_B$ devienne d/c.

Il est clair qu'après cette synchronisation, au même instant t_0 de S_0 on aura

$$t_B - t_A = 0 \quad (8)$$

donc t_B et t_A seront égaux, tandis que

$$\hat{t}_B - \hat{t}_A = \frac{(x_B - x_A)}{c} \quad (9)$$

et donc $\hat{t}_B$ - $\hat{t}_A$ seront différents. La simultanéité de $\hat{T}_A$ et $\hat{T}_B$ est manifestement distincte de celle de T_A et T_B ! Si P_A et P_B échangent des images dans lesquels les temps marqués par les horloges T et $\hat{T}$ sont indiqués tous les deux, ils découvrirons qu'ils ont le même âge au même instant $\hat{t}$, mais un âge différent au même instant t. Ce fait donne une nette prédominance des transformations inertielles sur les transformations de Lorentz. La nature elle-même semble encore une fois préférer les transformations inertielles pour décrire les propriétés physiques des systèmes inertiels concrètement réalisés. D'autres phénomènes existent aussi qui donnent des indications du même type, par exemple, l'effet Sagnac, mais nous ne pouvons nous étendre, faute de place.

Ces considérations nous montrent avec clarté le point d'aboutissement : une nouvelle théorie dans laquelle le ralentissement des horloges n'est plus relatif, mais dépend seulement de la vitesse par rapport à un repère privilégié. De ce point de vue tous les paradoxes du relativisme disparaissent. La simultanéité absolue demeure vraie, comme dans la physique Galiléenne, et cela élimine également le « paradoxe du futur réel » que l'on a discuté précédemment : tous les observateurs inertiels ont le même présent, et donc la même réalité. Finalement, l'existence d'un vide muni de propriétés physiques concrètes devient pleinement acceptable. Naturellement un problème est aussi de vérifier cette théorie expérimentalement, mais dans un certain sens c'est déjà fait par la nature elle-même, au moins dans le cas de l'effet Sagnac[36].■

Le professeur Franco Selleri travaille au département de physique de l'université de Bari. Il a écrit plus de 220 articles sur la physique des particules, la théorie quantique et la relativité. Il est intervenu dans le débat sur la théorie quantique au travers d'un livre, Quantum Paradoxes and Physical Reality *(1990), qui a obtenu des échos dans le monde entier. Cet article est la version révisée d'un article original publié en italien[37]. Il a été traduit par Philippe Guéret.*

Bibliographie

1. Isaac Newton, *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. Londuni, 1687. Traduit en. français par la Marquise du Châtelet, sous la direction de Clairaut, Paris, 1759, I, scholie.
2. *cf.* 1. II, scholie.
3. Cité par L. Geymonat, *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, vol. V (Garzanti, Milano, 1973), p. 237.
4. A. Einstein, *Annalen der Physik*, 49, 769 (1916).
5. *cf.* G. Mana et G. Zosi, *Riv. Nuovo Cim.* 18, 1 (1995).
6. A.A. Michelson and E.W. Morley, *Amer. Jour. of Science*, 34, 333, (1887).
7. L'hypothèse de Fitzgerald est rapportée par O. Lodge, *London Transac.*, A 184, 727 (1893).
8. H. A. Lorentz, *Amst. Verh. Akad.*, 1, 74 (1892).
9. H.A. Lorentz, *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen.* . (E.J. Brill, London, 1895).
10. W. Voigt, *Nachr. K.G.W. Göttingen*, 3, 41 (1887).
11. J. Larmor, *Æther and Matter*, (Univ. Press, Cambridge, 1900).
12. R.J. Kennedy and E.M. Thorndike, *Phys. Rev.*, 42, 400 (1932).
13. H.E. Ives and G.R. Stilwell, *Jour. Opt. Soc. Am.*, 28, 215 (1938). ; *ibid.* 31, 369 (1941).
14. J. Bailey, K. Borer, F. Combley, H. Drumm, F. Krienen, F. Lange, E. Picasso, W. von Ruden, F.J.M. Farley, J.H. Field, W. Flegel and P.M. Hettersley, *Nature*, 268, 301 (1977).
15. J.C. Hafele and R.E. Keating, *Science*, 177, 166 (1972).
16. G. Builder, *Austral. Jour. Phys.*, 11, 279 (1958) ; *ibid.* 11, 457 (1958).
17. H. Dingle, *Nature*, 179, 866 et 1242. H. Dingle, *Introduction*, dans : H. Bergson, *Duration and Simultaneity*, xv-xliii, The Library of Liberal Arts, Indianapolis (1965)
18. M. Klein, Paul *Ehrenfest* (North