

Le principe de la relativité et la nature du temps

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'infini, 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

FRANCO SELLERI

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 générale⁴. Ainsi il y a une part fondamentale 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 valeur⁵. 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 XX^e 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 (dédit de la 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 expéri-

mentale 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 mercure⁶.

Pour expliquer ces résultats, George Fitzgerald⁷ et indépendamment Hendrik Lorentz⁸ supposèrent que, dans l'éther, un mouvement de vitesse v provoque sur chaque corps une contraction de sa longueur l égale à

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

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 1887¹⁰. 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 Larmor¹¹ 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

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

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 Thorndike¹² ainsi que ceux d'Ives et Stilwell¹³, 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 CERN¹⁴. 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

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

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 :

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

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 $\sqrt{1-(0,99)^2} \approx 0,141$. Ainsi, pour le jumeau **F**, le voyage dure en réalité $64,6 \times 0,141 \approx 9$ 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 Keating¹⁵, qui utilisèrent plusieurs horloges atomi-

ques 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 Builder¹⁶. 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

