

Relativité et mesure du temps

par Gérard Petit*

Il n'est évidemment pas question de traiter ici tous les aspects qu'un tel titre peut recouvrir, je veux simplement rappeler quelques concepts de base et illustrer par quelques exemples l'importance de la théorie de la relativité dans les activités liées à la mesure du temps, et donc dans notre vie quotidienne.

Horloges et durées, échelles de temps et dates

Que mesure une horloge ? Le temps, bien sûr, mais doit-on encore une fois poser la question de sa définition ? Pour éviter d'utiliser continuellement ce mot aux multiples significations, nous dirons que ce qu'une horloge est capable de mesurer est une durée, l'intervalle de temps entre deux événements qui se passent dans le voisinage de l'horloge (entre un top départ et un top arrivée). Cette notion de voisinage est fondamentale dans la théorie de la relativité car elle permet de définir les quantités dites propres, directement mesurables par l'observateur, en particulier le temps propre d'une horloge.

Mais il est évident qu'on a également besoin (par exemple pour les études des astronomes qui peuvent s'étendre sur des siècles et des domaines d'espace très grands) d'une référence plus continue, plus "éternelle" que la seule mesure locale des durées. Cette référence doit aussi permettre de comparer des événements en des endroits différents : c'est une "échelle de temps". La date est la graduation d'une échelle de temps. Ceci nous fournit même la meilleure définition possible d'une échelle de temps : « un système non ambigu de datation des événements ». La notion correspondante en relativité est le temps-coordonnée.

Ces deux concepts, mesure de durée et échelle de temps, ont coexisté et progressé en parallèle pendant des millénaires, mais sans jamais se recouvrir. La raison principale en est que les appareils que l'homme a inventés pour mesurer commodément les durées étaient moins stables à long terme que les phénomènes qui servaient de référence (le tout premier d'entre eux étant la rotation de la Terre). Inversement ces références stables ne sont pas utilisables en pratique pour mesurer des durées, surtout très courtes (imaginons chronométrer une course de sprint avec un cadran solaire). Au fil des siècles, cette dualité durée / échelle de temps a été réalisée de plusieurs manières, dont on trouvera un résumé dans le Tableau 1.

* Pavillon de Breteuil. 92312 Sèvres Cedex.

Tableau 1 : Résumé historique des techniques utilisées pour mesurer les durées et pour définir une échelle de temps

Période	Horloge	stabilité	Echelle de temps	stabilité
Antiquité	« Sablier »	10^{-3}	Rotation de la Terre	10^{-4} - 10^{-6}
XVII ^e -XVIII ^e siècles	Chronomètre mécanique	10^{-5} - 10^{-6}	Rotation Terre / Orbites	10^{-6} - 10^{-7}
XX ^e siècle	Quartz	10^{-7} - 10^{-9}	Orbite Terre et Lune	10^{-9} - 10^{-10}
Années 1960	Transition état atomique	10^{-12} > 10^{15}	Transition atomique état	10^{-12} > 10^{15}

Dès l'Antiquité, les hommes ont mis au point des systèmes ingénieux utilisant la régularité de l'écoulement du sable ou d'un liquide (clepsydre) pour mesurer les durées. Par contre c'est le cycle des jours, c'est-à-dire la régularité de la rotation de la Terre, qui sert de base à l'échelle de temps. Les premiers changements vraiment importants sont intervenus aux XVII^e et XVIII^e siècles. La révolution technologique issue de la Renaissance a permis de développer des machines nouvelles pour mesurer les durées, comme le pendule ou le chronomètre. L'essor des voyages maritimes lointains et la nécessité de connaître l'heure pour trouver sa longitude en mer ont beaucoup contribué à ces développements. Par ailleurs, c'est toujours la rotation de la Terre qui sert de base à l'échelle de temps, mais la théorie s'est considérablement améliorée. A cette époque ont lieu également deux progrès essentiels: d'abord des innovations techniques (comme le télescope) améliorent considérablement les mesures astronomiques, ensuite les lois de la gravitation ont été découvertes ce qui fait qu'on commence à considérer les mouvements orbitaux sous l'aspect de leur régularité.

Au début du XX^e siècle, un nouveau bond technologique : les vibrations de cristaux de quartz permettent de mesurer encore mieux les durées. D'autre part les astronomes découvrent que le mouvement des corps célestes (Terre autour du Soleil, Lune autour de la Terre) est plus stable que la rotation de la Terre et devrait donc servir de base à l'échelle de temps ; cette échelle s'appelle le temps des éphémérides.

Depuis quelques dizaines d'années, ce sont les horloges atomiques, basées sur la fréquence associée à une transition atomique, qui permettent de mesurer les durées de la manière la plus précise. On a pu gagner en moins de 50 ans six ordres de grandeur sur l'instabilité relative de fréquence des horloges, le même facteur que pendant les 3000 ans précédents. Mais l'événement nouveau est que ce sont aussi les horloges atomiques qui permettent de former de la façon la plus pratique et la plus précise une échelle de temps. Et donc, alors que pour la

première fois une seule et unique technique (l'horloge atomique) mesure les durées et forme l'échelle de temps, la précision obtenue nous oblige à prendre en compte la théorie de la relativité dans laquelle les concepts de durée et échelle de temps se retrouvent justement dans deux quantités fondamentalement différentes, le temps propre et le temps-coordonnée...

La relativité : Temps propre et temps-coordonnée

Le temps propre a une définition locale et, stricto sensu, il ne peut être utilisé que localement, c'est-à-dire au voisinage immédiat de l'instrument qui le réalise. On peut le définir comme « ce qui est indiqué par une horloge idéale », ainsi que l'a suggéré Einstein (« ce qu'indique l'aiguille de ma montre.. »).

Le temps-coordonnée (coordonnée de temps) est purement conventionnel et n'a pas de représentation physique directe. Mais il a une portée globale, il est défini et peut être utilisé partout. Il permet de dater de manière unique et non ambiguë tout événement. Ainsi alors que deux observateurs assigneraient une date différente à un même événement s'ils utilisaient leur horloge propre, ils doivent trouver la même date s'ils utilisent un temps-coordonnée. Autre avantage, le temps-coordonnée permet à quelqu'un qui n'a pas pu observer un événement, ou même pour qui cet événement était totalement inobservable, de l'utiliser comme s'il en avait été témoin et s'il l'avait daté avec son horloge. Le prix à payer est que, pour convertir le temps propre d'une horloge en temps-coordonnée, il faut établir une théorie et faire des calculs.

Dans la vie courante, c'est un temps-coordonnée qui permet à tous d'utiliser une échelle commune pour dater les événements. Notons que, par la même occasion, on a aussi choisi une définition de la simultanéité : deux événements sont simultanés s'ils ont la même date en temps-coordonnée. Sur Terre, le temps-coordonnée couramment utilisé est UTC, le temps universel coordonné. Dans chaque pays le temps civil est, en général, formé en ajoutant ou retranchant un certain nombre d'heures à UTC.

La relativité dans la vie de tous les jours

Bien que la distinction entre temps propre et temps-coordonnée soit fondamentale, il est difficile de l'imaginer car elle échappe à notre expérience habituelle : ainsi si l'on se contente d'une précision d'une milliseconde sur la synchronisation de deux horloges ou la datation d'un événement, ces distinctions sont encore superflues. Mais en fait nous utilisons tous les jours sans nous en rendre compte des techniques qui ne fonctionnent que parce qu'il existe des horloges atomiques et qu'on peut synchroniser ces horloges ou dater un événement avec une précision d'une microseconde, voire quelques nanosecondes. Citons les télécommunications, dont les besoins augmentent constamment, et surtout les méthodes de positionnement radio par satellite. Ainsi le Global Positioning System américain (GPS) a besoin des meilleures horloges atomiques à bord de ses satellites et sur Terre. Dans ces systèmes, il est nécessaire de prendre en compte la théorie de la relativité. Ne pas le faire induirait, par

exemple, une erreur de plusieurs dizaines de mètres sur le positionnement par GPS.

Nous avons donc (de plus en plus) besoin d'introduire des « effets relativistes » dans de nombreux domaines (je devrais dire plus correctement traiter de manière relativiste de nombreux domaines). Ces effets relativistes sont de deux ordres, ceux qui tiennent à la différence entre temps propre et temps-coordonnée, ou entre les temps propres de deux horloges, et ceux qui tiennent à la propagation des signaux radioélectriques : ainsi la différence entre le temps-coordonnée de propagation et « la durée calculée en divisant la distance par la vitesse de la lumière » ou la différence entre la trajectoire d'un photon et la « ligne droite ». Ces effets ne sont pas toujours simples à modéliser précisément, mais il est assez facile d'en évaluer un ordre de grandeur : la valeur relative de l'effet est toujours de l'ordre de v/c où v est la vitesse caractéristique du phénomène par rapport au corps principal (horloge par rapport à la Terre, Terre par rapport au système solaire, système solaire par rapport à la galaxie) et c la vitesse de la lumière. C'est aussi l'ordre de grandeur du rapport U/c ou U est le potentiel gravitationnel du corps principal. Les Tableaux 2 et 3 fournissent quelques exemples de l'ordre de grandeur des « effets relativistes » dans de multiples domaines. On voit que, même si les effets les plus importants concernent des phénomènes astronomiques, les utilisations de la relativité sont bien à notre porte depuis que les horloges atomiques fournissent une stabilité relative de fréquence bien meilleure que 10^{-12} .

Tableau 2 : Exemples d'effets relativistes sur les fréquences des horloges

Localisation	v/c	$v^2/c^2 - U/c^2$	Durée caractéristique	Exemple d'effet
Sur Terre	$<10^{-6}$	$<10^{-12}$	$10^2 - 10^5$ s (minute-jour)	Comparaisons d'horloges
En orbite terrestre	10^{-5}	10^{-10}	$10^3 - 10^5$ s (heure-jour)	GPS ; GP-A
Dans le système solaire	10^{-4}	10^{-8}	10^7 s (mois-an)	Orbites des planètes ; comparaison horloges avec pulsars
Dans la galaxie	10^{-3}	10^{-6}	10^{14} s millions années)	Comparaison horloges avec orbite pulsars binaires (futur ?)
Au voisinage d'une étoile dense	$10^{-2}-10^3$	$10^{-4} - 10^{-6}$	10^4 s (heures)	Période d'un pulsar dans un système binaire

Tableau 3 : Exemples d'effets relativistes sur la propagation des signaux

Localisation	Durée de l'effet	Retard induit	Valeur relative	Exemple d'effet
En orbite terrestre	10^{-1} s	10^{-11} s	10^{-10}	Transmission de signaux radioélectriques (GPS etc..)
Dans le système solaire	10^3 s	10^{-5} s	10^{-8}	Retard des signaux radio Déflexion de la lumière
Au voisinage d'une galaxie	10^{11} s	10^5 s	10^{-6}	Lentilles gravitationnelles (déflexion et retard)
Au voisinage d'une étoile dense	1 s	10^{-5} s	10^{-5}	Retard des signaux d'un pulsar dans un système binaire