

Le temps

par Jean JANDALY
mél : jjandaly@normandnet.fr

RÉSUMÉ

*Le temps est une notion intuitive et subjective. C'est aussi une grandeur physique objective, qui se mesure de différentes façons. Les calendriers reposent sur des observations astronomiques. Mais les horloges mécaniques puis électriques, de plus en plus précises, ont mis en évidence les irrégularités de la rotation de la Terre. La seconde est maintenant définie sur la base de transitions atomiques. Le temps apparaît dans les lois de la physique. Mais peut-on parler **du** temps : existe-t-il un temps absolu ?*

Le temps est, pour l'homme, une notion intuitive de quelque chose qui s'écoule. Cette perception s'appuie à la fois sur des rythmes biologiques (battements cardiaques, respiration...), sur des processus physiologiques (faim, soif, fatigue, vieillissement), sur l'observation des rythmes de la nature (jours et nuits, saisons, climat...) et sur ceux de la vie sociale (actes de la vie quotidienne, travail, repos, vacances, anniversaires, fêtes...). Elle est affectée par des facteurs psychologiques puisque, par exemple, le temps passe moins vite quand on s'ennuie, ou encore, comme chacun s'accorde à le reconnaître, se déroule plus vite lorsqu'on avance en âge. Elle s'affine par exemple au travers de la maîtrise du langage (conduite du récit), ou de la représentation mentale d'échelles de temps diverses (âge de l'univers, âges géologiques, dates de l'histoire de l'humanité, durée de vie des particules élémentaires...).

Le temps est également une grandeur mesurable. L'unité de temps est toujours définie et mesurée par l'intervalle séparant deux événements, comme : [clepsydre pleine, clepsydre vide], [balancier à gauche, balancier à droite], [Soleil au zénith, Soleil au zénith], [population N de particules radioactives, population N/2], etc. Certaines de ces mesures reposent sur des observations astronomiques, d'autres non. La cohérence entre ces diverses mesures est une question capitale que nous aborderons.

Le temps intervient dans les lois de la physique. Nous verrons en particulier que le principe de l'inertie constitue, dans une certaine mesure, une définition du temps. Nous

verrons aussi que, dans certaines circonstances, il faut renoncer à parler *du* temps, puisque son écoulement dépend du référentiel dans lequel on le mesure.

1. LE PROBLÈME DES CALENDRIERS : JOURS, SEMAINES, MOIS, ANNÉES

Le découpage du temps en jours, semaines, mois, années a toujours reposé et repose encore sur des *observations astronomiques* :

- le jour solaire ;
- la lunaison ;
- l'année solaire.

Si les deux premiers découpages sont connus depuis toujours, l'année solaire ne fut semble-t-il définie - en se basant sur le retour des saisons - qu'au III^e millénaire avant notre ère, par les Mésopotamiens et par les Égyptiens. Le retour des saisons est une donnée difficile à déterminer avec précision et l'année comptait, pour des raisons que nous allons examiner, 354 jours chez les premiers et 360 jours chez les seconds, avec des systèmes de rattrapage de temps en temps lorsqu'un décalage trop grand avec les saisons se manifestait.

Trois difficultés majeures allaient se présenter aux concepteurs de calendriers :

- une lunaison n'est pas un nombre entier de jours ;
- une année solaire n'est pas un nombre entier de lunaisons ;
- une année solaire n'est pas un nombre entier de jours.

Ces obstacles furent découverts dans cet ordre et levés successivement.

Voyons comment les Mésopotamiens essayèrent de concilier le Soleil avec la Lune, autrement dit l'année solaire avec les lunaisons. Le cycle lunaire étant primordial à leurs yeux, ils fixèrent la durée d'un mois à 30 ou 29 jours, en alternance, pour correspondre au mieux avec la durée de la lunaison. L'année comptait 12 mois, de façon à s'approcher au plus près de l'année solaire basée sur le retour des saisons. Mais une telle année de 12 mois totalisant 354 jours ($6 \times 30 + 6 \times 29$), il fallait de temps en temps décréter une année de 13 mois pour rattraper un décalage qui devenait manifeste avec les saisons. Le calendrier musulman utilisé de nos jours étant directement issu du calendrier mésopotamien, la date du premier jour de l'an musulman se décale année après année de 11 jours lorsqu'on l'exprime dans notre calendrier occidental, dit calendrier «julien» (le 1^{er} Muharram 1420 correspond au 17.04.1999 et le 1^{er} Muharram 1421 au 06.04.2000, par exemple).

Les Égyptiens, quant à eux, comptaient 3 saisons correspondant aux 3 grandes périodes agricoles (inondation par le Nil, croissance des plantes, récoltes), et c'est donc le retour de la crue du Nil¹ à Memphis, la capitale, qui leur servait de repère pour déterminer la durée de l'année : ils l'évaluèrent ainsi initialement à 360 jours. L'année était découpée en 12 mois de trente jours. Plus tard, s'apercevant du décalage avec les saisons réelles qu'induisait leur année de 360 jours, ils cherchèrent un autre repère, et se tournèrent vers l'observation des astres, dont le mouvement était supposé régi par les dieux et donc régulier par nature : ils fixèrent le début de l'année le jour où l'étoile Sirius se situe juste à l'horizon au moment même où le Soleil se lève (ce choix était basé sur la bonne correspondance entre ce phénomène astronomique et le retour de la crue du Nil). L'année fut ainsi portée à 365 jours.

Les astronomes grecs remarquèrent, au V^e siècle avant notre ère, que l'année solaire compte non pas 365 jours exactement, mais plutôt 365 $\frac{1}{4}$ jours, soit un décalage de 1 jour tous les 4 ans avec l'année égyptienne. Pour tenir compte de cette observation, le système des années bissextiles fut officiellement institué par Jules César en - 45 (d'où le nom de «calendrier julien»). Mais la correspondance n'était pas encore parfaite, et un décalage continuait à exister entre l'année de ce calendrier et l'année solaire. En 1582, il fut décidé de retirer 10 jours à l'année civile pour la recalculer sur l'année solaire, et d'adopter la règle suivante : la première année d'un nouveau siècle ne sera pas bissextile (bien que multiple de 4), sauf si le nombre de siècles est multiple de 4 (ainsi 2000 sera bissextile, mais pas 2100). Ce système fut instauré par le pape Grégoire XIII, d'où le nom de «calendrier grégorien». C'est le calendrier que nous utilisons encore de nos jours en Occident ; le décalage avec l'année solaire est extrêmement réduit mais pas nul (1 jour en 3 300 ans, soit en moyenne 26 secondes par an).

2. LE PROBLÈME DU DÉCOUPAGE DE LA JOURNÉE : HEURES, MINUTES, SECONDES

Les premiers instruments rudimentaires

Les Anciens perçurent rapidement le besoin de fixer des repères dans le déroulement des journées, en particulier pour le bon déroulement des rites religieux. Depuis les Mésopotamiens, le jour était découpé en 12 heures. On utilisa d'abord le gnomon, simple piquet planté dans le sol, dont l'ombre permettait un repérage temporel dans la journée, soit par les variations de sa longueur soit par celles de sa position. Puis on fabriqua des cadrans solaires. À côté de ces instruments faisant appel au Soleil, on utilisait aussi des clepsydres (récipients à écoulement d'eau) présentant l'avantage de pouvoir fonctionner de jour comme de nuit.

1. Ces crues sont provoquées essentiellement par les pluies tropicales estivales sur les montagnes d'Éthiopie, d'où descend le Nil bleu, l'un des principaux affluents du Nil.

Les premières questions de cohérence des mesures

Rapidement, des problèmes de *cohérence* entre les instruments de mesure du temps apparaissent.

Il s'agissait là d'une part de la *dispersion* des mesures pour une même classe d'instruments : construire par exemple deux clepsydres se vidant exactement en une même durée n'était pas chose aisée.

D'autre part, et cette question est encore plus fondamentale pour la définition même du temps, se posèrent des problèmes lors de la *confrontation* des différents types d'instruments. Ainsi, on s'aperçut qu'il convenait de faire des cadrans solaires avec des secteurs angulaires inégaux, si l'on voulait que les heures indiquées par ces cadrans correspondissent toutes à un même nombre de clepsydres vidées. Au travers de cet exemple, il apparaît un fait important : si l'on veut diviser la graduation d'une horloge en durées égales, il faut confronter cet instrument à un autre capable d'indiquer des durées plus courtes. En ce qui concerne les clepsydres, les Anciens ne pouvaient les confronter qu'à d'autres clepsydres de volume moindre, et la méthode manquait de précision puisque aucune de celles retrouvées à ce jour n'indiquait des heures égales, malgré la forme tronconique qui leur était donnée pour tenter d'obtenir une variation de hauteur d'eau d'apparence régulière.

Le perfectionnement technique des horloges

L'origine du sablier n'est pas bien connue, mais cet instrument n'est de toute façon pas très différent, dans son principe, d'une clepsydre. Les Byzantins utilisaient également la durée de combustion de bâtons d'encens, de lampes à huile ou de chandelles (technique toujours appréciée des commissaires-priseurs, comme on sait !).

La technique horlogère fit un grand pas avec la découverte, en Chine au VIII^e siècle semble-t-il, du «mécanisme d'échappement». Celui-ci permet d'exploiter de façon astucieuse la chute des corps qui reste le principe moteur des horloges : il s'agit, au lieu que cette chute ne se fasse de façon continue, et donc nécessairement assez rapide, de la bloquer et de la débloquer par alternance. Une horloge à eau monumentale, haute de 10 mètres, a été construite en Chine au XI^e siècle sur ce principe : une roue porte à sa périphérie des godets destinés à recevoir de l'eau ; un godet se remplit et, dès qu'il est plein, la roue avance d'un cran et un autre prend sa place, tandis que l'horloge elle-même marque une unité de temps, par le biais de personnages mécaniques actionnant des cloches et des gongs.

En Europe, à la même époque, on utilise plutôt des horloges entraînées par un poids accroché à une corde. Le principe d'échappement est appliqué à ces horloges à

partir du XIV^e siècle : ce sont les pendules dites «à verge et foliot» (voir figure 1). Ceux de ces instruments construits avec les pièces les mieux ajustées présentent une dispersion moyenne de ¼ h par jour.

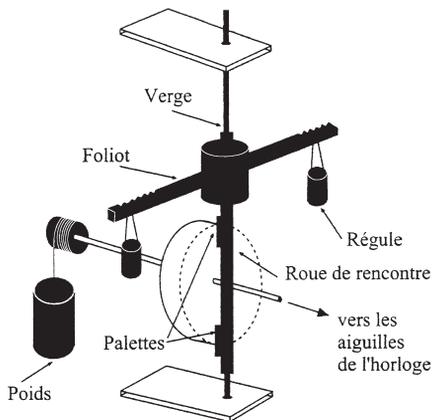


Figure 1 : L'horloge à «verge et foliot».

Elle comprend d'une part la roue de rencontre qui est mue par le «poids», donc toujours dans le même sens, et qui entraîne les aiguilles par l'intermédiaire d'engrenages simples. D'autre part l'ensemble «verge + foliot» qui peut osciller autour de l'axe vertical constitué par la verge, et dont les «régules» permettent de régler le moment d'inertie, donc la période d'oscillation. La roue de rencontre est dentée, et dans ces dents s'insèrent à tour de rôle les deux palettes haute et basse, solidaires de la verge, et disposées à 90° l'une de l'autre. Cette disposition très astucieuse fait que lorsqu'une palette est libérée par la roue, l'autre se retrouve prise et que le mouvement de cette dernière, imposé par l'ensemble «verge + foliot», vient s'opposer à la rotation de la roue. Bien que celle-ci l'emporte, finalement, son mouvement a été empêché et même inversé un court instant («échappement à recul»).

Quittant les seuls monastères, on voit bientôt fleurir les horloges sur les tours, les beffrois, les portes des villes, ainsi que sur les plus riches demeures.

Les horloges à poids, comme celles à eau, et comme les sabliers, sont mues par la force de pesanteur. En 1410, l'Italien Brunelleschi invente une horloge différente, mue par la détente d'un ressort comprimé. Cette technique permet de faire des horloges plus petites, et les premières montres apparaissent au début du XVI^e siècle.

Les dispositifs de régulation s'améliorent, en particulier grâce à Huygens qui, suite aux études de Galilée (voir plus loin), invente en 1657 la régulation par pendule. La dispersion des meilleures horloges atteint à cette époque ¼ minute par jour. C'est d'ailleurs au XVII^e siècle que l'aiguille des minutes fait son apparition, l'aiguille des secondes apparaissant quant à elle au XVIII^e siècle. La division du temps s'effectue en

base 60, selon une tradition qui remonte aux Babyloniens². La seconde est donc le $1/86400^{\text{e}}$ du jour solaire. Elle correspond à peu près au rythme des battements cardiaques, ce qui en fait une unité facile à se représenter.

3. LE TEMPS DANS LES LOIS DE LA MÉCANIQUE CLASSIQUE

A la suite des observations de Tycho Brahe sur l'orbite de la planète Mars, Kepler énonce en 1609 (de façon empirique) la nature elliptique du mouvement des planètes autour du Soleil, ainsi que la loi des aires : le rayon joignant le Soleil à la planète balaye des aires égales pendant des temps égaux. En 1619, il énonce sa troisième loi, de façon empirique également : les carrés des périodes de révolution des planètes sont proportionnels aux cubes des grands axes de leurs orbites. Le temps tel qu'il apparaît dans les lois de Kepler est exprimé en jours, il est donc mesuré *a priori* par la rotation de la Terre ; mais, et c'est bien un des intérêts majeurs de ces lois, le temps peut maintenant tout aussi bien être mesuré à partir de l'observation d'une planète quelconque.

Galilée expose en 1638 le résultat de ses expériences sur le mouvement et sur la chute des corps. Étudiant de façon systématique le roulement d'une boule de bronze sur un plan incliné, il conclut que les espaces parcourus sont comme les carrés des temps, autrement dit que le mouvement est uniformément accéléré. Pour mesurer les temps, Galilée utilise d'une part son propre pouls (!), d'autre part une horloge à eau, pour laquelle il suppose que la masse d'eau écoulée en un temps donné est proportionnelle à ce temps. Galilée étend à la chute libre la loi du mouvement uniformément accéléré. Il étudie également les pendules oscillants et observe que leur période est proportionnelle à la racine carrée de la longueur du fil.

On doit aussi à Galilée d'avoir pressenti le principe de l'inertie. du moins dans certaines situations particulières : «j'imagine qu'un mobile a été lancé sur un plan horizontal d'où l'on a retiré tout obstacle : il est déjà certain, d'après ce qu'on a dit ailleurs plus longuement, que son mouvement se poursuivra uniformément et éternellement sur ce même plan, pourvu qu'on le prolonge à l'infini», «sur le plan horizontal le mobile se trouve indifféremment au mouvement et au repos, ne tendant par lui-même à se mouvoir dans aucune direction et n'opposant aucune résistance au mouvement», «la résistance de l'air lorsqu'il [un corps en chute libre] vient d'une grande hauteur, et cela quelle que soit sa gravité, sera telle qu'elle l'empêchera d'augmenter sa vitesse, et pour finir réduira son mouvement à l'uniformité».

2. En 1792, les révolutionnaires français instaureront un «calendrier républicain» basé sur un système décimal : l'année comptait 10 mois de trente jours (plus 5 ou 6 jours de «sans-culotides»), découpés chacun en 3 «décades» remplaçant les semaines ; la journée était divisée en 20 heures et l'heure en 100 minutes : des horloges graduées de cette façon furent construites ; Napoléon I^{er} décida en 1806 le retour au calendrier grégorien.

En 1644, Descartes reprend et précise le principe d'inertie : «chaque partie de la matière, en son particulier, ne tend jamais à continuer de se mouvoir suivant des lignes courbes, mais suivant des lignes droites, bien que plusieurs de ces parties soient souvent contraintes de se détourner, parce qu'elles en rencontrent d'autres en leur chemin [...] chaque chose en son particulier continue d'être en même état autant qu'il se peut, et jamais elle ne le change que par la rencontre des autres». Descartes voit en ce principe une des volontés de Dieu.

Gassendi affirme la validité du principe de l'inertie dans un espace très éloigné de notre monde, où les corps seraient soustraits à l'attraction terrestre.

Dans son ouvrage daté de 1686, *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, œuvre fondatrice de la mécanique qui connaîtra une immense diffusion, Newton élève le principe de l'inertie au rang d'une des trois grandes lois du mouvement. Or **le principe de l'inertie définit le temps** : en effet, il énonce qu'un corps qui n'est soumis à aucune action extérieure est soit au repos soit en mouvement rectiligne uniforme, autrement dit que des distances égales sont parcourues en des temps égaux. Par conséquent, une horloge, pour marquer le temps correctement, doit effectuer un même nombre de battements pendant que le corps isolé parcourt des distances égales. Le temps est désormais intimement lié à l'espace. Mais où trouver des corps véritablement isolés ? Newton se tourne vers les astres et analyse leur mouvement comme résultant d'une combinaison de deux causes : l'inertie d'une part qui tendrait à les conduire en ligne droite, et l'attraction gravitationnelle d'autre part qui les ramène vers le Soleil. Il parvient à démontrer simplement, par la géométrie, la généralité de la loi des aires pour toute force centrale, à partir du principe de l'inertie et de la modeste hypothèse que deux forces agissant ensemble pendant un temps t donné amènent un corps au même endroit que si les deux forces avaient agi successivement chacune pendant ce même temps t .

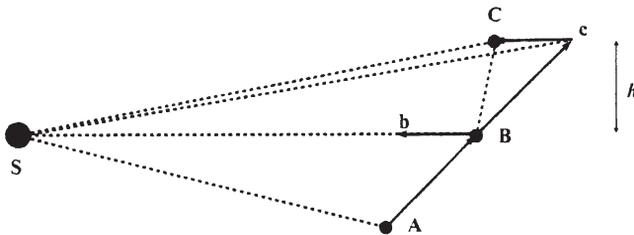


Figure 2 : La planète décrit un temps t un arc AB que l'on confond avec la corde AB . Pendant la durée t suivante, la planète, si elle n'était pas soumise à l'attraction du Soleil, parcourrait un segment Bc dans le prolongement et de même longueur que AB (principe de l'inertie). Mais l'attraction du Soleil occasionne un mouvement de la planète en sa direction, représentée par le segment Bb . En composant par la règle du parallélogramme Bc et Bb , on obtient BC c'est donc la position effective de la planète. Or les triangles SBC et Sbc sont d'aire égale (même base BS , même hauteur h), ainsi que Sbc et SBA (pour la même raison). SAB et SBC ayant même surface, la loi des aires est démontrée. [Nota : Newton n'utilise pas de segment fléché].

Avec Newton, le temps, déjà mesurable expérimentalement par de nombreuses méthodes concordantes, a changé de statut. Il est maintenant défini de façon *absolue* à partir des trajectoires des astres, en vertu de la loi des aires dont la généralité est désormais établie : pour mesurer une durée, il suffit de mesurer une surface. Newton lui-même défend l'idée de ce temps «absolu, vrai et mathématique, qui coule uniformément».

Au XVIII^e siècle, les mathématiciens comme Leibniz, Bernoulli, Varignon, Euler, Lagrange, Laplace, vont reprendre les lois du mouvement formulées par Newton en les exprimant au moyen du calcul différentiel et intégral. Le temps y apparaît sous forme différentielle, comme dans l'expression du principe fondamental de la dynamique que nous écrivons maintenant $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$. On note que ce principe contient celui de l'inertie (si la force \mathbf{F} est nulle, alors l'accélération \mathbf{a} est nulle également). Il permet de déterminer l'équation horaire de n'importe quel mouvement si l'on connaît l'expression de \mathbf{F} . Grâce à ce principe on établit par exemple facilement la période T des petites oscillations d'un pendule de longueur l , soit $T = 2\pi (l/g)^{1/2}$.

Dès le milieu du XVII^e siècle, Huygens avait introduit la notion de force centrifuge. Clairaut, en 1742, étudie la forme que prend le principe fondamental de la dynamique (PFD) dans un référentiel en mouvement curviligne, et introduit la notion de force d'inertie d'entraînement. Dans les années 1830, Coriolis donne l'expression complète des forces d'inerties \mathbf{F}_i qui doivent être prises en compte dans le PFD, qui s'écrit dès lors $\mathbf{F} + \mathbf{F}_i = m\mathbf{a}$. Des expériences célèbres menées au XIX^e siècle (déviation vers l'Est, pendule de Foucault) ne peuvent s'interpréter qu'en prenant en compte les forces d'inertie dues à la rotation de la Terre par rapport au référentiel géocentrique. S'il est vrai que, pour interpréter la plupart des expériences, on peut pratiquement appliquer le PFD dans un référentiel lié au laboratoire sans tenir compte des forces d'inertie dues à la rotation de la Terre, les termes correctifs étant faibles, il n'en reste pas moins que **le temps n'est plus défini de façon absolue par le principe d'inertie**. En effet, pour définir le temps à partir de ce principe, on n'a pas d'autre solution que de *postuler le caractère inertiel*³ d'un référentiel donné : c'est ce qu'avait fait implicitement Newton à propos du référentiel héliocentrique, dans lequel il se plaçait pour décrire le mouvement des astres. Une autre possibilité est de définir le temps de façon purement **opératoire** (c'est-à-dire à partir de l'indication fournie par un instrument) : c'est la solution choisie actuellement (voir plus loin la définition de la seconde). Le temps étant ainsi défini, il est possible d'apprécier le caractère plus ou moins inertiel de tel ou tel référentiel.

3. On dit qu'un référentiel est «inertiel», ou «galiléen», si on peut y appliquer le principe d'inertie et le PFD sans tenir compte d'aucune force d'inertie.

4. LES PROGRÈS DE LA MÉTROLOGIE

La grande confrontation entre les horloges mécaniques et le Soleil

Les navigateurs savent depuis longtemps évaluer leur latitude, mais, pour déterminer leur longitude, ils doivent mesurer l'heure locale au moyen du sextant (il est midi quand le Soleil culmine) et la comparer à l'heure du méridien de référence, qu'ils connaissent et conservent en emportant un chronomètre. La précision de ce chronomètre doit être la meilleure possible, de l'ordre de quelques secondes par jour, car les erreurs cumulées jour après jour peuvent devenir très importantes après des mois de navigation. Un instrument d'une telle précision, baptisé «chronomètre de marine», est réalisé pour la première fois par l'horloger anglais Harrison en 1761. C'est grâce à de tels instruments qu'est mise en évidence au XVIII^e siècle *l'irrégularité du jour solaire par rapport à ces horloges* : elle varie au cours de l'année entre + 14 et - 16 minutes, suivant une courbe régulière que l'on baptise «équation du temps» et que l'on retrouve dès lors fréquemment comme abaque corrective auprès des cadrans solaires. Cette variation régulière et répétitive de la période de rotation terrestre par rapport au Soleil peut se retrouver par le calcul, en tenant simplement compte du fait que d'une part l'orbite terrestre est une ellipse (la vitesse orbitale n'est donc pas constante), d'autre part l'axe des pôles n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique.

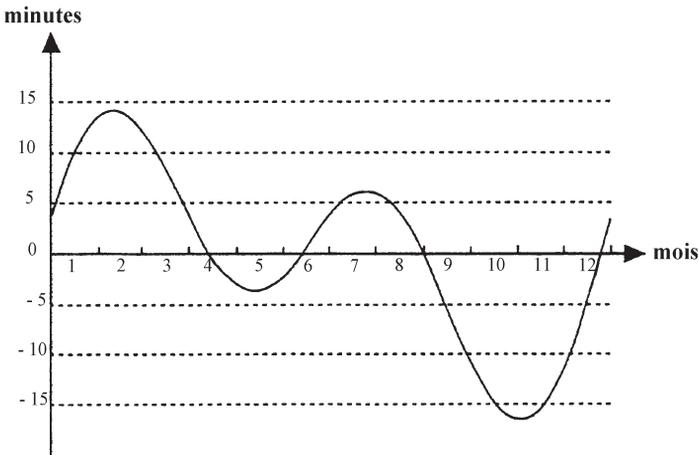


Figure 3 : «L'équation du temps» indique l'écart entre la durée du jour solaire et celle donnée par les horloges mécaniques.

C'est semble-t-il le philosophe Kant qui pressent le premier, au milieu du XVIII^e siècle, un autre phénomène : un ralentissement lent et continu de la rotation de la Terre sur elle-même, à cause du freinage dû aux marées. Ce phénomène sera mesuré au

XX^e siècle par des méthodes astronomiques⁴, et confirmé par l'étude de coraux fossiles : le jour durait par exemple 21 heures il y a 500 millions d'années ! Ce ralentissement est en moyenne actuellement de $1,6 \times 10^{-3}$ s par siècle.

De nouveaux étalons du temps ; vers moins d'une nanoseconde d'écart par jour !

Les horloges et les montres mécaniques ne vont cesser de gagner en précision grâce à divers perfectionnements techniques, comme par exemple l'utilisation à partir de 1919 de l'invar, alliage à coefficient de dilatation quasi nul. On atteint une dispersion inférieure à 10^{-2} s par jour.

En 1929 apparaissent les montres asservies par quartz. Un quartz piézo-électrique se comporte comme un circuit électrique fictif constitué d'une résistance, d'une bobine et d'un condensateur, et possédant une fréquence propre très précise. La dispersion atteint rapidement de l'ordre de 2×10^{-3} s. Dans les années 30, grâce aux horloges à quartz, on découvre⁵, en plus du ralentissement dû aux marées déjà évoqué, de petites variations périodiques de la vitesse de rotation de la Terre sur elle-même, expliquées par des déplacements saisonniers de masses d'air. D'autres fluctuations irrégulières (non calculables) pouvant atteindre quelques millisecondes par jour, sont attribuées à des mouvements atmosphériques, océaniques ou magmatiques. La Terre ne s'avère donc pas être une si bonne horloge !

Les quartz étant des matériaux sensibles à la température, on cherche ensuite à mesurer le temps sur la base d'un phénomène physique indépendant de ce paramètre. La première horloge atomique, utilisant la fréquence de résonance de la transition spin haut - spin bas de l'atome de césium 133 (voir plus loin la définition exacte), est créée en 1954. Les horloges atomiques à césium construites par la suite atteignent une dispersion inférieure à 10^{-9} s par jour. Actuellement, les «fontaines à césium» font mieux que 10^{-10} s par jour, et des améliorations de plusieurs facteurs sont attendues prochainement.

D'autres principes physiques peuvent servir à mesurer le temps. On peut ainsi se baser sur le comptage d'une population d'éléments radioactifs : on appelle «période» d'un élément le temps nécessaire pour que la population ait diminué de moitié. Elle peut être très longue ($4,5 \times 10^9$ années pour l'uranium 238, par exemple) ou assez courte (10^{-4} s pour le polonium 214, par exemple). C'est dans le domaine des très longues durées que la radioactivité est largement utilisée, pour les datations géologiques

4. Travaux de Spencer Jones sur les positions par rapport à la Terre de la Lune, de Vénus, de Mercure et du Soleil, 1939.

5. Stoyko, astronome français, 1937.

par exemple. La période n'est modifiée ni par la température, ni par la pression, ni par le volume de matière, ni par la combinaison chimique dans laquelle entre l'élément.

Une horloge atomique au césium effectue une transition quantique en 10^{-10} s environ (voir ci-après la définition de la seconde). Or il existe en physique des temps plus courts, comme les périodes de désintégration des particules élémentaires ($1,07 \times 10^{-12}$ s pour les mésons D^+ et D^- , $8,4 \times 10^{-17}$ s pour le méson π^0 , $2,8 \times 10^{-19}$ s pour le méson η^0 ou encore $1,3 \times 10^{-25}$ s pour le boson intermédiaire Z^0 , pour ne prendre que quelques exemples). Comment ces temps sont-ils évalués ? Jusqu'à 10^{-15} s environ, une mesure «semi-directe» est possible à partir de la distance que parcourt sur le détecteur la particule avant de se désintégrer : il suffit de diviser cette distance par la vitesse de la particule, elle-même connue à partir de son énergie, et d'appliquer la correction relativiste due à la dilatation du temps (à ce sujet, voir plus loin l'exemple des mésons π). Pour des durées inférieures à 10^{-15} s, la durée de vie τ de la particule ne peut pas être mesurée, mais seulement calculée à partir de la relation de Heisenberg $\Delta E \cdot \tau = h / 2\pi$ (h constante de Planck), où ΔE représente la gamme d'énergie pour laquelle cette particule a une probabilité supérieure à $1/2$ de se désintégrer (pour laquelle, autrement dit, la population diminue au moins de la moitié).

Comme on l'a souligné, le critère pour le choix de tel ou tel type d'horloge de référence est que la dispersion entre différents instruments fonctionnant sur ce même type soit la plus petite possible. Il est, *a posteriori*, absolument remarquable de constater la cohérence des mesures de temps fournies par des instruments fonctionnant sur des principes physiques aussi différents que la chute des corps, les vibrations d'un quartz piézo-électrique, les transitions atomiques ou les désintégrations radioactives. Une telle concordance semblerait conforter l'idée d'un temps absolu. Nous verrons plus loin ce qu'en dit la théorie de la relativité.

Définitions légales du temps

Jusqu'en 1956, l'unité de temps est la seconde, définie comme étant la fraction $1/86400^e$ du jour solaire moyen (durée du jour solaire moyennée sur une longue période, et donc débarrassé de toutes ses variations telles qu'elles apparaissent dans «l'équation du temps»). Le temps légal est donc celui indiqué par une horloge qui battrait $86400 \times n$ fois en n jours (avec n grand) : on l'appelle Temps Solaire Moyen (TSM). Mais il faut de plus définir un instant zéro : le temps GMT (Greenwich Mean Time) est le temps solaire moyen, en prenant comme origine 0 heure au moment où le Soleil passe au zénith du méridien de Greenwich. Le temps universel (TU) est le temps GMT augmenté de 12 heures, de façon à avoir 0 heure à minuit. Une légère correction est apportée pour tenir compte du déplacement quasi périodique (de quelques mètres) de la position des pôles par rapport à la surface terrestre : cela donne le temps TUI.

Mais la rotation de la Terre n'est pas uniforme, comme on l'a souligné plus haut. On a donc décidé, dans les années 50, de se baser sur la période de révolution de la Terre autour du Soleil, et non plus sur la rotation de la Terre sur elle-même. La seconde est alors définie comme la fraction $1/31556925,9747$ de l'année tropique 1900 : c'est le Temps des Éphémérides (TE) ; il est adopté comme temps légal en France par le décret du 3 mai 1961.

En 1964, la seconde de l'horloge atomique est adoptée par la Conférence Internationale des Poids et Mesures : «1 seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins $F = 4$, $M_F = 0$ et $F = 3$, $M_F = 0$ de l'atome de césium 133 dans son état fondamental $2S\ 1/2$ non perturbé par des champs extérieurs» ; c'est le Temps Atomique (TA). De façon à s'affranchir des risques de panne liés à l'utilisation d'une seule ou de quelques horloges de référence, on définit en 1971 le TAI (Temps Atomique International), moyenne du TA sur un ensemble d'horloges atomiques commerciales (un peu moins précises que les horloges de pointe), au nombre actuellement de 230 environ réparties dans 65 laboratoires dans le monde. Les autres unités de temps sont définies à partir de la seconde :

$$1 \text{ jour} = 24 \text{ heures} = 1\,440 \text{ minutes} = 86\,400 \text{ secondes.}$$

Mais les navigateurs maritimes et aériens ont toujours besoin de TU pour faire le point précis de leur position. Un compromis entre TAI et TU1, appelé TUC (Temps Universel Coordonné), a donc adopté en 1972 :

$$\text{TUC} = \text{TAI} + n \text{ secondes (n entier relatif)}$$

$$|\text{TUC} - \text{TU1}| < 0,9 \text{ seconde}$$

Autrement dit, le TU impose sa loi pour les nombres entiers de secondes, et le TAI pour toutes les décimales. Dans la pratique, tous les un ou deux ans, il faut rajouter 1 seconde au TUC pour respecter l'écart maximal de 0,9 seconde avec TU1 : ceci est décidé et effectué par le Bureau central de l'International Earth Rotation Service à Paris.

Le TUC est la base du temps légal en France depuis le décret du 9 août 1978 : le temps légal vaut $\text{TUC} + 1 \text{ h}$ en hiver ($\text{TUC} + 2 \text{ h}$ en été), conformément au découpage de la Terre en 24 fuseaux horaires institué en 1887.

5. LE TEMPS REDÉFINI PAR LES THÉORIES DE LA RELATIVITÉ

Les muons sont des particules élémentaires qui, lorsqu'elles sont au repos, se désintègrent spontanément suivant la loi $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$ avec N_0 population à l'instant $t = 0$, $N(t)$ population à l'instant t et $\tau = 2,21 \times 10^{-6} \text{ s}$. On a par ailleurs observé (l'expérience décrite ici date de 1963) le passage d'un faisceau de muons en mouvement très

rapide devant deux détecteurs distants de 1907 m : à l'instant où le faisceau traverse le premier détecteur, l'horloge de ce détecteur indique t_1 ; au moment où le faisceau traverse le second détecteur, son horloge indique t_2 . Les horloges des deux détecteurs étant parfaitement synchronisées, le temps de vol est sans équivoque $t' = t_1 - t_2 = 6,4 \times 10^{-6}$ s. Or le premier compteur ayant détecté le passage de 563 muons et le second de 408, on peut calculer le temps écoulé d'après la loi de décroissance indiquée plus haut. On obtient $t = 2,21 \times 10^{-6} \ln(563/408) = 7,1 \times 10^{-7}$ s. Le temps t n'a de signification que dans le référentiel où les muons sont au repos (c'est dans un tel référentiel que la loi de décroissance a été établie). Le temps t' , lui, a été mesuré dans le référentiel où les muons sont en mouvement. Le fait est *incontournable* : *le temps ne s'écoule pas de la même façon* dans le référentiel lié aux muons et dans le référentiel où ils sont en mouvement (on parle parfois de «dilatation du temps»).

Les résultats de cette expérience menée dans les années 40 sont en fait qualitativement et quantitativement parfaitement conformes aux prévisions de la théorie de la relativité, bâtie essentiellement par Einstein au début du XX^e siècle. Cette théorie avait été construite pour expliquer notamment un fait expérimental incontestable, et pourtant absolument contraire à notre intuition : quand un observateur mesure la vitesse de la lumière (en divisant la distance parcourue par la durée du parcours telle qu'indiquée par deux horloges placées au début et à la fin du trajet, ou par toute autre méthode revenant au même), il obtient toujours 3×10^8 m.s⁻¹, que la source lumineuse soit immobile, qu'elle s'approche de lui ou qu'elle s'éloigne de lui. La théorie de la relativité, longtemps discutée et contestée, est maintenant totalement admise, notamment parce qu'elle a reçu de nombreuses vérifications expérimentales. Il faut nous faire à l'idée que *les durées entre deux événements ne sont pas égales, autrement dit des pendules identiques ne battent pas le même nombre de coups, suivant les référentiels où ces observations sont faites* : **l'idée de temps absolu de la mécanique newtonienne doit être abandonnée.**

Dans le cadre de la relativité dite «générale», non seulement le temps dépend du référentiel, mais de plus son écoulement est affecté par la présence d'objets massifs : plus le champ gravitationnel est intense, plus il se déroule lentement au lieu considéré. Les preuves expérimentales attestant de la validité de la relativité générale sont incontestables («mirages gravitationnels» dus à la courbure des rayons lumineux par les objets massifs, par exemple).

En 1971, une expérience sur la dilatation du temps a été menée *directement* sur des horloges atomiques au césium : l'une était embarquée dans un avion volant vers l'ouest, l'autre dans un avion volant vers l'est, la troisième restant au sol ; le tour du monde étant bouclé pour les deux horloges embarquées, on observa que la première avait 273 nanosecondes d'avance, la seconde 59 nanosecondes de retard, valeurs parfaitement conformes aux prévisions de la théorie de relativité générale.

Toutefois, les variations d'écoulement du temps d'un référentiel à l'autre ne sont significatives que lorsque leur vitesse relative est non négligeable devant celle de la lumière, ou encore si le champ gravitationnel n'est pas uniforme, ce qui ne se manifeste pas dans les observations de la vie quotidienne, ni même pour beaucoup d'observations scientifiques limitées au laboratoire terrestre (les expériences sur les particules élémentaires sont cependant une notable exception). Il reste donc très souvent possible de parler *du* temps. Par ailleurs, dans le cadre de la théorie de la relativité générale appliquée à l'univers (et plus particulièrement dans le cadre du modèle dit «standard» basé sur l'hypothèse d'un univers homogène et isotrope), il est possible d'utiliser un temps unique : en effet la théorie établit qu'il existe partout dans l'univers un ensemble d'observateurs dont les horloges, si elles sont synchronisées à un instant, le resteront toujours. Ce temps, qui n'a rien d'absolu mais qui est fort commode, est appelé «temps cosmique». C'est lui qui est utilisé, par exemple, pour dater les événements dans l'histoire de l'univers.

BIBLIOGRAPHIE

Nota : les indications qui suivent chaque référence ne décrivent pas l'ensemble du contenu de l'ouvrage : elles expriment seulement une préférence personnelle.

- H. BARREAU, *Le temps*, PUF coll. Que sais-je ?, 1996.
Pour la vision synthétique d'ensemble.
- R. TATON, *Histoire générale des sciences*, Quadrige / PUF, 1994.
Pour l'évolution des idées en mécanique.
- P. RICHEL, *L'âge du monde*, Seuil, 1999.
Pour les systèmes mythologiques de la naissance et de la structure de l'univers.
Pour la physique du globe.
- D.E. DUNCAN, *Le temps conté*, NiL éd., 1999.
Pour les anecdotes historiques sur les acteurs de l'histoire du temps et des calendriers.
- *Dictionnaire des inventeurs et inventions*, Larousse, 1996.
Pour une chronologie des découvertes en horlogerie, à l'article «heure».
- B. JACOMY, *Une histoire des techniques*, Seuil coll. Points Sciences, 1990.
Pour la description de l'horloge chinoise du XI^e siècle, et pour l'usage des horloges au Moyen Âge.
- *Les grandes inventions*, Larousse, 1994.
Pour la description des horloges et du chronomètre de marine.
- P. FLEURY et J.-P. MATHIEU, *Mécanique, Physique*, Eyrolles, 1959.
Pour des indications sur le fonctionnement des horloges mécaniques : échappement, régulation.

- *Le temps*, Science et vie junior, H.S. n° 30, 1997.
Pour la description des horloges à verge et foliot, des horloges à ressort spiral et fusée, des montres, ainsi que des horloges atomiques.
- Le site web du Bureau des longitudes :
<http://www.bdl.fr/solarys/projet/glossaire.html>
Pour les définitions des temps TS, TSM, TE, TA, etc.
- M. SONNEVILLE et D. FAUQUE, *La gravitation*, CNDP, 1997.
Pour les textes de Galilée.
- NEWTON, *De la gravitation, du mouvement des corps*, Gallimard coll. tel, 1995.
Pour le temps en mécanique classique.
- J. H. SMITH, *Introduction à la relativité*, Masson, 1997.
Pour le temps en relativité restreinte.
- P. LÉNA, *Les sciences du ciel*, Flammarion, 1996.
Pour le temps en relativité générale.
- E. KLEIN, M. SPIRO (dir.), *Le temps et sa flèche*, Flammarion coll. Champs, 1996.
Pour la notion de temps cosmique.