



Quasar 95

Le Temps

1. Introduction

Le temps à toujours eu avec l'astronomie un rapport privilégié dans la mesure où elle en a été le fournisseur incontesté pendant des siècles et qu'elle en est aujourd'hui (juste retour des choses) un utilisateur de premier plan.

Le temps (celui qui passe) fait partie de ces notions tellement simples et intuitives que l'on est en peine d'en donner spontanément une définition précise.

Sait-on donner une véritable définition du temps ? Curieusement, sa mesure s'est affinée au cours des siècles d'une façon à peine imaginable. Dans le même temps, la physique s'est affinée aussi rendant la question "*qu'est ce que le temps*" de plus en plus délicate. Aujourd'hui si l'on devait définir le temps, tout au plus pourrait-on dire quelque chose du genre :

*Pour décrire l'univers, il faut d'abord se définir un espace géométrique à trois dimensions **plus quelque chose d'autre**, une certaine grandeur qui se comporte et qui semble avoir les propriétés de ce que les êtres humains désignent simplement comme le **temps qui passe**.*

Pour prendre en compte un autre aspect fondamental de la physique moderne, il faut aussi se rappeler que le temps, et surtout *son sens* intervient à chaque fois que l'on évoque *l'irréversibilité des phénomènes physiques*. Enfin pour préciser notre rapport au temps, il faut aussi dire que la perception que l'on en a, est étroitement liée à la nature de notre conscience et notre faculté de mémoriser les événements.

Pour illustrer la difficulté à définir le temps, je vous en donne la (savoureuse) définition du petit Larousse :

Mesure de la durée des phénomènes...

Bien d'autres avant Monsieur "Petit-Larousse" on compris qu'il y avait une difficulté conceptuelle et on tenté une définition du temps ...

Citons en deux

Pour **Newton** par exemple dans un texte de commentaires sur les "**Principia**" :

Le temps absolu, vrai et mathématique qui est sans relation à quoi que soit d'extérieur, en lui même et de par sa nature, coule uniformément; on l'appelle aussi "durée"...

Dans un autre genre, citons saint Augustin qui a bien vu la difficulté:

Qu'est-ce donc que le temps ? Si personne me le demande, je le sais; mais si on me le demande et que je veuille l'expliquer, je ne le sais plus.

Faute de définir ce temps, l'homme a appris à y inscrire des repères puis à quantifier ces repères les uns par rapports aux autres. On appelle cela *mesurer le temps*.

L'homme se contente de mesurer le temps

On tente dans ce qui suit de faire comprendre le mécanisme de sa mesure.

La façon la plus élémentaire d'apprécier le temps est de repérer un événement, de le mémoriser puis d'observer une nouvelle fois son déroulement. Le premier "outils" qui nous permet d'appréhender le temps est donc *notre mémoire*. Cette mémoire nous prépare en particulier à attribuer ou à ne pas attribuer à des événements semblables le qualitatif

uniforme

On dira qu'un événement est uniforme s'il nous semble se reproduire de façon régulière par rapport à nos fonctions vitales.

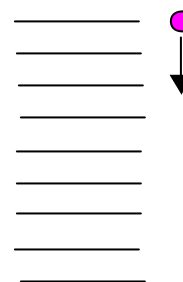
Essayons d'imaginer *la découverte du temps* dans une civilisation ancienne.

Un homme parcourant un chemin AB plusieurs fois de suite dans des *conditions de fatigues identiques* aura tendance à dire que ces événements sont "réguliers" ou qu'ils se déroulent de façon "uniformes".

Supposons que cet homme cherche maintenant à savoir combien de fois il pourra au cours de sa vie accomplir une certaine action X. Pour cela, il peut par exemple accomplir *une fois* cette action X et compter combien de fois son frère est capable d'accomplir *simultanément* le trajet AB. Le second outils fondamental de la mesure du temps est donc un "compteur numérique". L'hypothèse sous-jacente à cette *mesure* est que le trajet AB est toujours accompli de façon identique. Notre homme qui a mémorisé *l'expérience de la fatigue* cherchera naturellement à substituer à ce *mécanisme humain* peu fiable un mécanisme plus fiable, il dira *plus uniforme*.

Pour cela, notre homme lance un concours dans son entourage et deux personnes lui proposent les deux procédés de mesure suivants:

1. On accroche un caillou au bout d'une corde et l'on compte les oscillations. (C'est un pendule) Chaque oscillation représente une unité de temps.
2. On trace sur un mur (ou un arbre) des traits horizontaux et on lâche une pierre du haut du mur. A chaque fois que la pierre franchit une barre verticale, on dit que le temps a augmenté d'une unité.



Les deux personnes réalisent leurs dispositifs, puis ils les comparent et au bout d'un certain temps, chacun dit à l'autre :

Ton dispositif n'est pas uniforme.

Qui a raison ? Quel temps est-il uniforme ?

Si l'exemple précédent est naïf et caricatural, il montre néanmoins que

- la mesure du temps repose toujours sur un phénomène considéré comme uniforme.
- l'on ne sait pas définir le temps "ex nihilo" en dehors de tout contexte physique.

De quel moyens a-t-on disposé pour mesurer le temps au cours des âges ?

Le tableau suivant en donne une liste des *moyens naturels* à notre disposition. Ils présentent tous un inconvénient, ils n'offrent pas une résolution suffisante pour rythmer l'activité humaine à l'intérieure d'une journée.

Moyen	discussion
La vie d'un homme ou d'un animal	Trop imprécis
Le retour des saisons	Trop long mais intéressant pour l'agriculture
Les lunaisons	Complémentaire du précédent.
La succession des jours et des nuits	Rythme la vie mais pas de sous multiple

La première préoccupation de l'homme pour la mesure du temps a été de construire des dispositifs capables de repérer un événement à l'intérieur d'une journée. Les dispositifs furent nombreux. Un dispositif intermédiaire entre l'horloge naturelle liée aux astres et les horloges réalisées par l'homme est le *cadran solaire*. Notons d'abord que pour "étalonner" un cadran solaire, il faut disposer d'un dispositif construit par l'homme et réputé uniforme. Par ailleurs, il demande du soleil, et est peu transportable.

On ne peut pas citer tous les dispositifs de mesure du temps construits par l'homme tant ils sont nombreux et astucieux : Citons les plus anciens de ces dispositifs :

Dispositifs	inconvénients
Sablier, Clepsydre à eau Bougies	Pas d'enchaînement automatique après la mesure d'une unité de temps
Pendule	Mouvement amorti par les frottements

2. La notion d'horloge

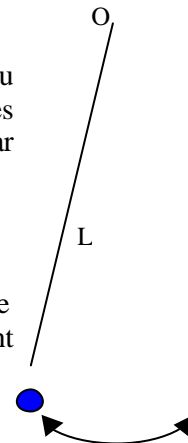
2.1 L'horloge mécanique

La découverte du pendule marquait cependant une date importante. L'intérêt du pendule est que sa période est indépendante de sa masse et de l'amplitude des oscillations, elle ne dépend que de sa longueur L . La période "T" est donnée par la formule bien connue:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}}$$

En réalité, le pendule est un oscillateur harmonique amorti. Pour faire une véritable horloge, il faut compenser l'amortissement. Il y a deux catégories de gens qui savent faire des *oscillateurs entretenus* :

- Les physiciens
- Les enfants que jouent à la balançoire.



La balançoire a sa fréquence propre d'oscillations liée à la longueur de la corde. Le principe de l'entretien du mouvement est d'injecter au *bon moment, et avec la fréquence propre de la balançoire* la petite impulsion qui compense exactement la perte d'énergie par frottement (les enfants vous l'expliqueront mieux que moi...).

Le principe des oscillateurs s'inspirent de celui de la balançoire en compensant la perte d'énergie par frottement. Une montre mécanique fonctionne sur le même principe, un oscillateur à ressort bat régulièrement libérant à chaque période un système d'engrenage entraîné par un ressort que l'on remonte tous les soirs. L'astuce vient du fait que le mécanisme dit d'échappement sert non seulement à libérer le mécanisme d'une unité de temps mais aussi envoie une légère impulsion à l'oscillateur pour compenser les pertes.

On a ainsi construit pendant des années des mécanismes de plus en plus précis qui étaient en phase avec le mouvement de la terre à mieux que la minute. En cumulant les écarts de la montre, on était donc en mesure de constater que la terre et la montre mécanique ne donnait pas tout à fait le même temps.

Qui avait raison ?

Les lois de la mécanique telles que les a énoncés Newton font l'hypothèse de l'existence d'un espace absolu mais aussi d'un temps absolu, donc s'écoulant par définition de façon uniforme. Notons que l'uniformité d'écoulement du temps newtonien est pour une large part liée à la simplicité des équations de la mécanique. Dans ce contexte, une horloge est un phénomène dont une grandeur caractéristique G varie en fonction du temps sous la forme

$$G = A * t + B$$

Prenons comme grandeur G l'angle que fait le méridien d'une étoile avec une direction quelconque sur la terre. Si l'on considère la terre comme isolée, aucun couple ne s'exerce sur elle et par conséquent son moment cinétique $\sigma(t) = J.dG/dt$ doit être égal à une constante σ^0 . Si le moment d'inertie J est fixe, ce qui suppose que les entrailles de la terre sont relativement stables, alors $dG/dt = \sigma^0/J$ est un terme constant et l'équation précédente s'intègre aisément en :

$$G(t) = (\sigma^0/J) . t + B$$

Dans ce cas, la terre constitue bien une horloge puisque G et t sont proportionnels.

Supposons maintenant que suite à un mystérieux phénomène, la terre s'allège de 0,1% par siècle. Son moment d'inertie J est donné sensiblement par $J=(2/5)M_T.R^2$. La masse M_T de la terre au temps t serait donc donnée par la formule simple suivante :

$$M_T(t) = M_T(0) (1 - a.t) \text{ avec } a = (0,01/3,155) * 10^{-11}$$

On peut montrer que dans ce cas, $G(t)$ est donné avec une bonne approximation par :

$$G(t) = (\sigma^0/J) . \{ t + a.t^2/2 + \dots \} + B$$

Le jour sera défini comme l'intervalle de temps au bout duquel $G(t)$ a augmenté de 360° . On montre aisément à l'aide de l'expression précédente que la durée du jour aura diminué de 0,1% soit 86 secondes au bout d'un siècle.

On pourrait faire le même genre de calcul en supposant que toute la population du globe décide tous les mois d'août de passer ses vacances à l'équateur et s'y rendre en voiture. On aurait alors une augmentation du moment J et par conséquent un allongement de la durée du jour au mois d'août.

Bien sûr, les ordres de grandeur ci-dessus sont faux et entre l'horloge mécanique et la rotation de la terre, il n'y a aucun doute possible, la terre est bien la plus précise.

2.2 Les horloges électroniques

Sur le modèle de l'oscillateur mécanique, l'homme a ensuite construit des horloges électroniques stabilisées par les oscillations d'un quartz. Cette fois, on a gagné plusieurs ordres de grandeurs en précision. Pour obtenir la meilleure précision possible, il faut toutefois prendre des précautions draconiennes sur la température dans laquelle doit baigner une telle horloge.

L'étape suivante a consisté à construire des horloges encore plus stables, les horloges atomiques dont la fréquence de résonance est bien plus indépendante des conditions externes que les horloges à quartz. On a rapidement constaté que ces dispositifs étaient plus réguliers que l'horloge terrestre.

Il s'est alors posé une série de problèmes :

Comment définir un temps utile à toutes les applications qu'elles soient scientifiques ou civiles ? En fait on y est pas parvenu et on définit aujourd'hui plusieurs temps que l'on sait raccrocher les uns aux autres

3. Inventaire des "temps astronomiques":

Le temps astronomique utilise deux "horloges" distinctes:

- la rotation de la terre sur elle-même qui donne la succession des jours et des nuits
- la rotation de la terre autour du soleil qui rythme les saisons.

La mesure du temps et l'établissement d'un calendrier doivent tenir compte de ces deux mouvements dont les durées ne sont pas multiples l'une de l'autre.

3.1 Le jour :

3.1.1 Le jour stellaire :

C'est l'intervalle de temps moyen qui sépare 2 passages consécutifs d'une étoile au méridien d'un lieu. En temps universel (TU) on a :

$$\text{Un jour stellaire} = 23\text{h } 56\text{ m et } 4,0989\text{ s}$$

Rappelons que le soleil parcourt environ un degré par jour ($360^\circ/365,25$). Il faut donc environ 4 minutes de plus pour retrouver le soleil sensiblement au même endroit que la veille. Le jour stellaire est relativement bien constant mais n'a pas d'intérêt pratique pour rythmer la vie humaine à long terme.

3.1.2 Le jour sidéral :

C'est un peu l'équivalent du jour stellaire, mais la direction de référence est cette fois le point γ . Rappelons que ce point symbolise l'intersection des plans de l'écliptique (orbite de la terre) et de l'équateur. Cette direction est d'une grande importance pour l'établissement du calendrier. C'est seulement en faisant en sorte que cette direction tombe toujours au voisinage du 21 mars que nous pourrons continuer à voir éclore les premiers bourgeons à cette date et non pas aux alentours de 15 août par exemple.... Le point γ est donc comparable à une planète très éloignée du soleil et qui accomplirait une révolution complète en près de 26000 ans. (Cette planète serait située à 876 UA, soit 132 milliards de kilomètres du soleil)

Le jour sidéral est plus court que le jour stellaire de 0,0084 seconde car le point γ vient à la rencontre du soleil suite à son mouvement de "rétrogradation" En temps universel on a donc:

$$\text{Un jour sidéral} = 23\text{h } 56\text{ m et } 4,0905\text{ s}$$

3.1.3 Le jour solaire moyen:

Le *jour solaire moyen* est le *temps moyen* qui s'écoulent entre deux passages du soleil au méridien. Il vaut par définition 24 h 0m 0s. Contrairement au jour sidéral ou stellaire, le terme *moyen* est ici très important puisque suivant les périodes de l'année, ce temps peut être en avance ou en retard de plusieurs minutes suivant l'époque de l'année. En pratique, on ne sait donc pas déduire le temps solaire moyen d'une observation de la position vraie du soleil. Pour raccorder le temps solaire moyen au temps sidéral, il faut faire intervenir la définition de l'année (tropique) de la manière suivante :

Au bout d'une année tropique, la terre a fait 365,2422 tours sur elle-même par rapport au soleil.

A une constante additive près (de 12 heures) le temps universel et le temps solaire moyen sont identiques.

3.2 L'année :

3.2.1 L'année sidérale:

L'année sidérale est le temps qui s'écoule entre deux conjonctions entre le soleil et une étoile fixe quelconque.

Cette année vaut 365,25626 jours solaires moyens.

3.2.2 L'année tropique :

L'année tropique est le temps qui s'écoule entre deux conjonctions entre le soleil et le point γ . L'intérêt de cette année est de respecter le rythme des saisons sur terre qui sont liées à la déclinaison du soleil.

Cette année vaut 365,24220 jours solaires moyens.

Pendant de nombreuses années, l'année tropique a servi à définir la seconde de temps considérée comme la fraction $1/31556925,9$ de l'année 1900,0

3.2.3 L'année anomalistique:

Cette année est le temps qui s'écoule entre deux passages de la terre au périhélie. Cette année est légèrement plus longue que l'année tropique car le périhélie se déplace lentement dans le sens direct (trigonométrique).

3.3 Echelle de temps événementielle.

Il s'agit d'une échelle de temps qui se contente de compter les jours depuis le 1^{er} janvier de l'an 4713 avant J.C. Cette période est utilisée à la fois par les astronomes et par les historiens. Ainsi, le jour qui commence à midi le 0 janvier 1900 (soit le 31/12/1899) porte le numéro 2415020.

Cette échelle est commode pour établir des éphémérides sur de longues périodes. Elle permet entre autre d'éviter les ambiguïtés résultant de la réforme grégorienne du calendrier en 1582.

En 1973 l'Union Astronomique Internationale a préconisé l'emploi du "jour julien modifié (MJD en anglais) qui consiste à soustraire 2400 000,5 jours à la période julienne classique. (L'origine de cette échelle tombe le 17/11/1858)

3.4 Le temps des éphémérides :

L'astronome américain Newcomb au début du siècle a synthétisé les observations accumulées sur plusieurs siècles pour écrire la longitude moyenne du soleil débarrassé des inégalités périodiques sous la forme

$$L = L_0 + A*t + B*t^2$$

Lorsque t est exprimé en siècles juliens de 35625 jours, le terme A vaut $100\{360^\circ + 0.9768925^\circ\}$ et le terme B vaut 1,089 secondes d'arc.

Cette formule définit implicitement une échelle de temps. En effet, il suffit en principe de mesurer L_{vrai} , de débarrasser cette mesure des termes périodiques qui sont calculables et on en déduit une équation en "t" qui est une *horloge implicite*.

Cette façon de mesurer le temps est importante d'un point de vue théorique mais s'est toujours heurtée à deux écueils:

- La précision reste médiocre à cause des nombreuses corrections à appliquer aux mesures
- Le système "se mord la queue" dans la mesure où l'on a besoin d'un temps "indépendant" pour vérifier les équations de la dynamique à l'aide d'observation alors que sa définition est justement dans la grandeur que l'on veut mesurer.

Malgré les difficultés, ce temps remplacera progressivement pendant la première moitié de notre siècle le temps "terrestre" fondé sur la rotation terrestre, au moins pour les questions impliquant de grandes périodes de temps.

N.B. Une autre difficulté de la définition du temps astronomique est l'introduction de la relativité.

4. Le temps atomique:

L'année 1955 est une année charnière:

- Albert Einstein qui a remis en cause les "idées simples" sur le temps disparaît

- Les premières horloges atomiques entrent dans les observatoires.

Rappelons que ces étalons de temps, principalement les horloges à césium sont fondées sur des horloges à quartz recalées par des oscillateurs fondés sur le mouvement vibratoire de certaines molécules.

L'apparition de ce nouveau temps plus précis (plus régulier) que le temps astronomique va poser des problèmes qui ne pourront être résolus qu'en adoptant plusieurs échelles de temps.

4.1 Le TAI:

Le TAI ou Temps Atomique International est un temps fondé sur la comparaison entre plusieurs horloges réparties en différents points du globe et mis en œuvre par différents pays. On compte aujourd'hui plus de 200 étalons internationaux. L'étalon français est situé à l'observatoire de Paris.

En pratique, le TAI est donc une sorte d'entité abstraite matérialisée par le retard ou l'avance moyenne de chaque horloge étalon par rapport à la moyenne de ces étalons, cette moyenne étant considérée comme exacte.

Ce temps est aujourd'hui considéré comme uniforme avec une précision jamais atteinte dans le passé.

Le TAI sert à des usages scientifiques ou encore à synchroniser les systèmes tels que le GPS.

4.2 Le TUC:

Le TUC est le Temps Universel Coordonné. Adopté en 1972, c'est un astucieux mélange de TU et de TAI. Le TUC est un TAI décalé d'un nombre entier (et connu) de secondes pour suivre au mieux le TU. Dès que le TU et le TUC varient de plus d'une seconde, on vous fait une journée (souvent le 31 décembre) de 23h 59m et 59 s. ce qui permet d'avoir un temps officiel en accord

- avec la terre même si elle paresse un peu et
- le temps atomique, réputé uniforme.

La différence entre le TAI et le TUC était de 27 secondes en 1992 et augmente d'environ 0,7 s par an. A partir du TUC, les utilisateurs scientifiques peuvent rétablir le TAI. Le TUC est à la base du temps légal depuis 1978.

5. Les aspects relativistes du temps:

N.B. *Ce sujet est très vaste, on ne fait ici que l'effleurer.*

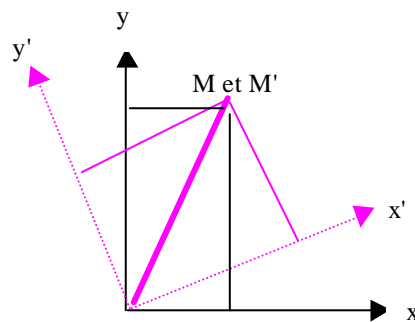
On l'a vue, le temps est moins simple qu'il n'y paraît... Pourtant, le temps évoqué jusqu'à présent est conceptuellement au moins assez proche de celui qu'on imaginait à la fin du XIX^e siècle... Comme vous le savez, un certain nombre de physiciens au nombre desquels on peut citer Einstein, Poincaré Lorentz et Minkovski, ont complètement bouleversé notre conception de l'espace et du temps *en les fusionnant en une seule entité* appelée l'espace-temps. Que reste-t-il dans ces conditions de la représentation classique du temps telle qu'elle vient d'être exposée ?

La réponse est relativement simple :

- Il reste tout tant que l'on se situe dans un référentiel "galiléen" fixe
- On doit apporter des corrections dès l'instant où l'on envisage des référentiels en mouvement les uns par rapport aux autres. (à des vitesses importantes)

Pour comprendre comment se "mélange" l'espace et le temps, il suffit de faire l'analogie avec les rotations de l'espace ordinaire.

En effet, considérons un point M rapporté à un repère XoY. Ce point M est repéré par ses deux coordonnées (x,y). Supposons maintenant que l'on fasse tourner le repère XoY autour de o d'un angle θ . Dans le repère X'oY', les coordonnées du nouveau point M (appelé M') sont x' et y'. L'examen des valeurs de x' et y' ou un petit calcul mathématique montrent que :



- x' et y' s'expriment de façon linéaire en fonction des (x,y), c'est sous la forme:

$$x' = a.x + b.y$$

$$y' = c.x + d.y$$

avec a, b, c, d ne dépendant que de l'angle θ et pas du point M

- Il existe un invariant, c'est la distance de l'origine "o" au point M. Le carré D^2 de cette distance s'exprime à l'aide du "théorème" de Pythagore qui s'écrit:

$$D^2 = x^2 + y^2$$

- l'invariance de la distance s'exprime par:

$$x^2 + y^2 = x'^2 + y'^2.$$

Tout cela est apparemment fort simple... Notons toutefois qu'il y a dans ces concepts une *fausse évidence*, c'est le "théorème" de Pythagore. *Le théorème de Pythagore ne se démontre pas*, il fait partie des axiomes de base définissant notre espace ordinaire. Une bonne façon d'aborder le sujet de la relativité est d'imaginer des espaces dans lesquels l'équivalent du théorème de Pythagore qui donne la distance entre deux points s'exprime d'une autre manière.

Imaginons maintenant un espace à 2 dimensions dont les deux dimensions seraient une coordonnée spatiale "x" et un temps "t". L'unité de temps est choisie de telle sorte que la lumière parcourt *une unité de distance* (par exemple 1 m) en *une unité de temps*. Imaginons que dans cet espace nous définissions une transformation des coordonnées appelée "pseudo-rotation" et qui aurait les propriétés suivantes:

- La distance d'un "point" à l'origine est donnée par

$$D^2 = x^2 - t^2 \quad (\text{Pythagore se retourne dans sa tombe mais tant pis ...})$$

- Cette distance est invariante lors d'une transformation:

$$x^2 - t^2 = x'^2 - t'^2.$$

- Les nouvelles coordonnées s'expriment en fonction des anciennes par des relations linéaires de la forme:

$$x' = a.x + b.t$$

$$t' = c.x + d.t$$

Une telle transformation présente donc toutes les propriétés des rotations élémentaires de notre espace usuel. De même que l'on ne s'étonne pas que x et y aient chacun varié au cours de la rotation, de même il ne faut pas s'étonner que le temps et la distance aient variés au cours d'une pseudo-rotation.

Cette définition de l'espace choque profondément notre sens commun. Pourtant Einstein a montré au début du siècle que c'est bien dans cet espace appelé "espace de Minkovski" avec 3 coordonnées d'espace ordinaires et une coordonnée de temps que nous vivons, pratiquons l'astronomie et bien d'autres choses encore...

Remarquons pour conclure que l'espace et le temps ont un point commun important:

Ils n'existent qu'en présence de matière ou d'énergie. Dans un espace *vide de toute matière*, on ne peut définir physiquement ni temps ni espace géométrique au sens classique.