

Le temps au XXI^{ème} siècle

Françoise Suagher *suite et fin dans le n° 83*

Après avoir écrit un feuilleton sur la mesure du temps pour les CC, il restait un écueil : faire le point sur les échelles de temps du XXI^{ème} siècle et comprendre ce que représentent les notions de temps des Ephémérides, UT₁, de temps universel coordonné U.T.C... Cet article vous permettra de mettre vos pendules à l'heure.

I - Introduction

La "mesure" du temps est un problème complexe, car le vocabulaire que nous employons prête à confusion. Il existe deux sortes de grandeurs, les grandeurs mesurables (comme les masses, les longueurs, les durées) dont on peut définir l'égalité et la somme et les grandeurs repérables, pour lesquelles on ne peut définir qu'une relation d'ordre comme les températures et les dates. Dans le cas du temps, les mots utilisés dans les deux situations, échelle de temps et durée sont les mêmes. J'ai rendez-vous à 8h ... (date) j'ai dormi pendant 8h ... (durée). Les horloges naturelles comme le mouvement des astres, l'accumulation des couches sédimentaires, la croissance des arbres sont des échelles de temps. Les horloges artificielles, pendules, montres ou chronomètres comptabilisent la durée de phénomènes périodiques et indiquent des durées. Si on cherche à comparer deux instants et à savoir s'ils sont simultanés ou si l'un des deux a eu lieu avant l'autre on utilise alors une échelle de temps. Si on cherche

la durée d'un événement de temps on l'obtient par le cumul de phénomènes périodiques, sans se référer nécessairement à une échelle de temps. Si on dispose d'une échelle de temps, la durée s'obtient par différence des dates extrêmes. Encore faut-il qu'on ne travaille pas avec un élastique...

Il est nécessaire de savoir fabriquer une unité de temps, un intervalle de temps universel, reproductible, un étalon : la seconde. Les spécialistes sont confrontés à deux problèmes : savoir fabriquer précisément une seconde, problème d'exactitude, et être capable de la reproduire pour mesurer correctement des intervalles de temps, et obtenir une échelle de temps uniforme et fiable, problème d'uniformité.

Pendant des siècles, on a utilisé le mouvement apparent des astres, dû à la rotation de la Terre comme échelle de temps d'une part et comme moyen de définir la seconde à partir d'une fraction de jour, jusqu'à ce que l'on s'aperçoive que cette horloge naturelle était trop imparfaite.

II - Les Temps Historiques

1 - Temps solaire vrai

Le temps solaire vrai n'est pas un temps uniforme : en particulier, la durée du jour solaire vrai diffère à certaines époques de l'année de plusieurs secondes sur sa valeur moyenne.

La durée du jour solaire vrai est plus longue de 30 secondes en décembre que la durée du jour moyen de 86400 secondes (fig.1). L'écart de durée entre deux jours consécutifs est dû, d'une part à la variation de déclinaison du Soleil d'un jour à l'autre, et également à la variation de la position de la Terre sur son orbite elliptique.

Cumulé sur plusieurs semaines, l'avance ou le retard, connu sous le nom d'équation du temps, peut atteindre 16 minutes (fig.2). Le défaut de régularité du jour solaire est de l'ordre de $30 / 86400$ soit 3×10^{-4} . Ce phénomène n'a pas pu être chiffré tant que les horloges n'avaient pas la précision suffisante.

Dès 1551, les tables pruteniques de Reinhold permettent le calcul de l'équation du temps en utilisant les hypothèses de Copernic. Huyghens se servait de l'équation du temps vers 1650 et John Flamsteed publie en 1672, des tables d'équation du temps.

2 - le temps solaire moyen

Le temps solaire moyen, débarrassé des irrégularités du temps solaire vrai, correspond à un Soleil fictif qui serait animé d'un mouvement uniforme sur l'équateur céleste. Il a commencé à être utilisé par les astronomes à partir de 1650, Picard l'utilise en

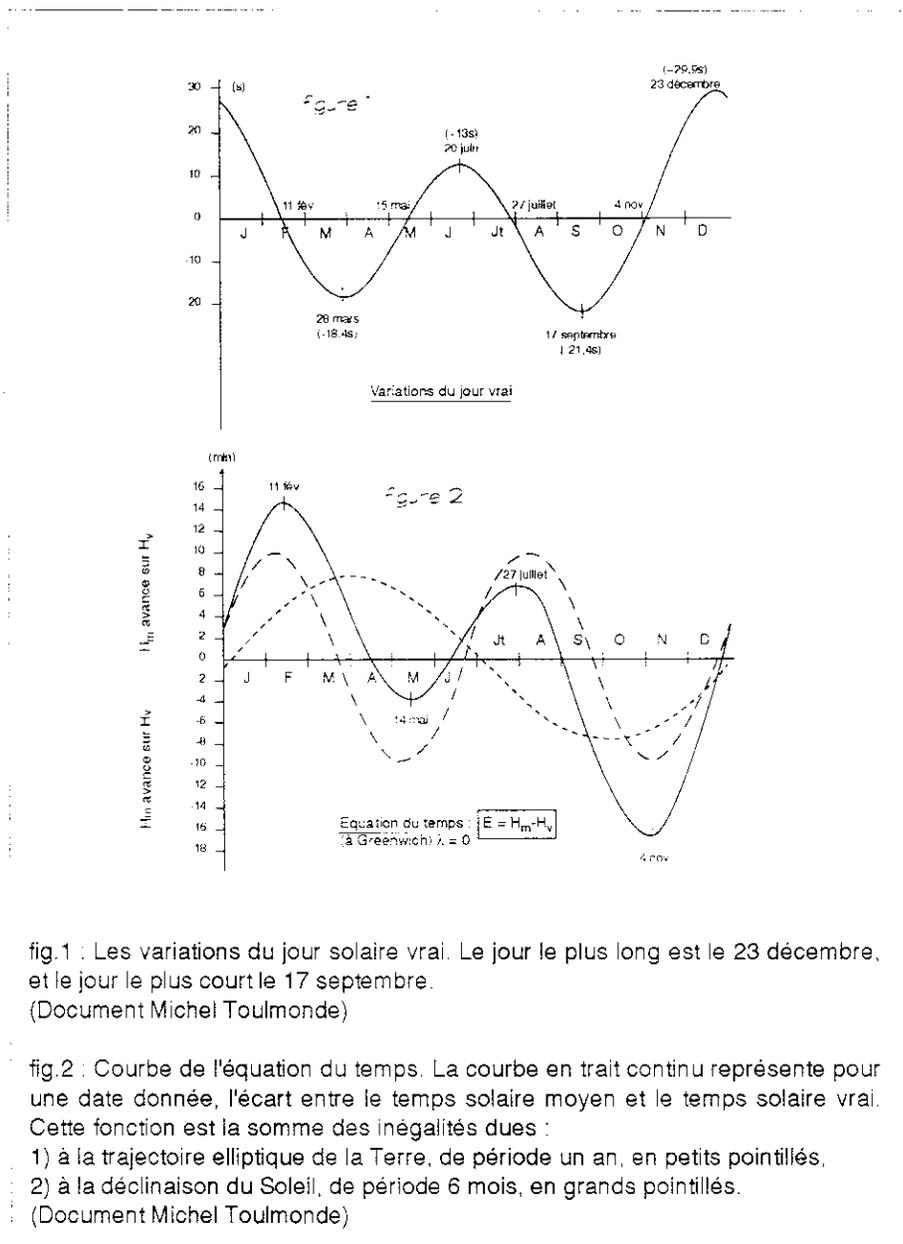


fig.1 : Les variations du jour solaire vrai. Le jour le plus long est le 23 décembre, et le jour le plus court le 17 septembre. (Document Michel Toulmonde)

fig.2 : Courbe de l'équation du temps. La courbe en trait continu représente pour une date donnée, l'écart entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai. Cette fonction est la somme des inégalités dues :
1) à la trajectoire elliptique de la Terre, de période un an, en petits pointillés,
2) à la déclinaison du Soleil, de période 6 mois, en grands pointillés. (Document Michel Toulmonde)

1666, et son emploi se généralise à Paris, sur les horloges publiques, à partir de 1816. Le jour solaire moyen permet de définir un temps étalon : de l'élaboration du Système Métrique (1793) jusqu'au XXI^{ème} siècle, l'unité de temps est la seconde de temps moyen définie comme la fraction $1 / 86400$ du jour solaire moyen.

3 - Le temps universel. (abréviation officielle : UT)

Le temps universel est un temps dérivé du temps solaire moyen ; c'est le temps solaire

moyen de Greenwich augmenté de 12 heures. Pour la détermination pratique de UT, on aurait pu observer le passage du Soleil au méridien et apporter des corrections. Mais il n'y a qu'un seul passage au méridien observable par jour, et l'observation du disque solaire est très difficile. On a préféré mesurer le temps sidéral TS qui s'obtient par le passage dans le méridien de certaines étoiles régulièrement réparties sur le ciel (les 1535 étoiles du catalogue FK4). UT et TS sont liés par une relation mathématique simple. La détermination de UT a montré que celui-ci n'était pas uniforme...

III - Les irrégularités du temps universel

1 - Le ralentissement séculaire

UT étant supposé uniforme, on pensait pouvoir écrire tous les phénomènes de mécanique céleste en identifiant la variable t des équations par UT. Pendant longtemps, les éphémérides astronomiques donnaient les positions des astres en fonction de UT, comme par exemple l'éphéméride de la Lune, publiée en 1857 par Hansen. Or, en 1870, Newcomb s'aperçoit que les positions de la Lune diffèrent des positions calculées par Hansen, et d'autant plus que le temps passe. En dépouillant des observations antérieures, il constate aussi un désaccord. S'agit-il d'une imperfection de la théorie du mouvement des corps célestes ou s'agit-il d'un ralentissement de la Terre ?

Remontons l'histoire pour connaître l'avis des astronomes des siècles antérieurs. Copernic a toujours supposé la rotation de la Terre comme uniforme. Au XVI^{ème} siècle, il n'avait d'ailleurs aucun moyen de prouver le contraire, les horloges n'ayant pas la

précision suffisante. Au XVII^{ème} siècle, Kepler et Newton font des allusions au fait que la rotation n'est peut-être pas uniforme. En 1767, Halley disposant des Tables Alphonsines donnant les éphémérides du Soleil et de la Lune, calcule des dates d'éclipses et cherche à vérifier ses calculs par des observations d'éclipses anciennes, mais les résultats ne collent pas... En 1767 Lalande écrit : "Il pourrait y avoir un décalage de 2 à 3 secondes par an, on ne le verrait pas".

Au XIX^{ème} siècle, Newcomb se penche sur le problème et en 1870, il estime le ralentissement de la Terre à 2,3 millisecondes par siècle carré. (C'est une décélération à comparer avec $g = 9,81 \text{ m / s}^2$). Ce phénomène est lié au couplage Terre-Lune. Les marées induisent des frottements, qui provoquent un ralentissement de la Terre et un éloignement de la Lune, de quelques cm par an. Le retard accumulé atteint 45 secondes sur 100 ans, 1h 15 min sur 1000 ans et 5 heures sur 2000 ans. Ce ralentissement est dit séculaire.

On calcule actuellement la durée du jour solaire moyen par la formule :

$$J = 86\,400 + 0,001\,64 T \text{ où } T \text{ est compté en siècle depuis le 1er janvier 1900 à } 0\text{h.}$$

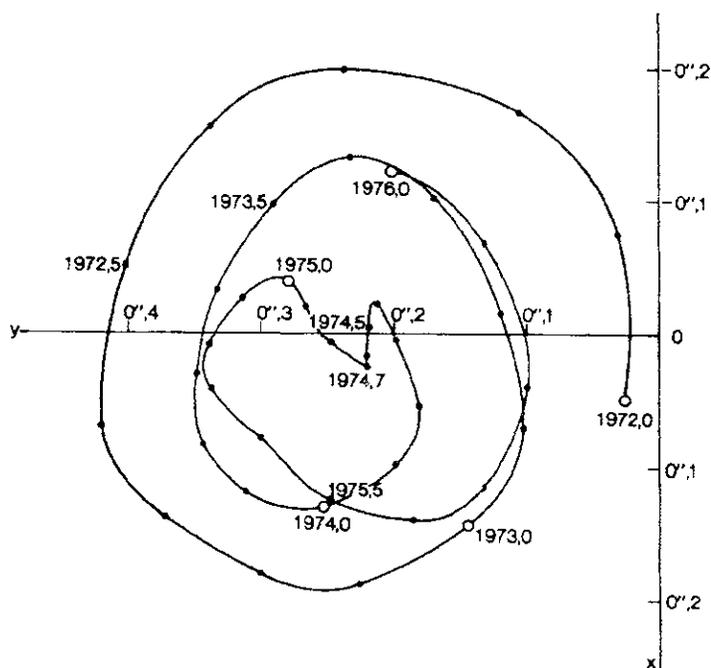
2 - Influence du mouvement du Pôle

Le pôle instantané de rotation de la Terre n'occupe pas une position fixe à la surface du globe. Il décrit une courbe, la polhodie, qui, depuis qu'on sait la tracer, n'est jamais sortie d'un cercle de 30 m de diamètre (fig 3). Le déplacement est infime mais suffisant pour que les valeurs de UT obtenues dans les observatoires astrométriques ne soient pas directement comparables. Depuis 1955 on donne :

$$UT_0, \text{ les valeurs brutes, ainsi que } UT_1 = UT_0 + \Delta \lambda$$

La correction $\Delta \lambda$ relative au mouvement du pôle peut atteindre quelques dizaines de millisecondes. UT_1 est donc le temps universel rapporté à la position instantanée de l'axe de rotation terrestre. Il a une précision de l'ordre de 6×10^{-7} . C'est lui qui doit être utilisé dans tous les cas où l'on a besoin de connaître la position de la Terre dans l'espace.

figure 3



Trajectoire du pôle sur la sphère céleste (d'après l'encyclopédie du Bureau des Longitudes 1977)

3 - Les irrégularités saisonnières

On savait la rotation de la Terre affectée par des variations séculaires, mais en 1937, A et N Stoyko, à l'Observatoire de Paris, remarquent que toutes les horloges (les horloges à quartz existent depuis quelques années) ont tendance à avancer au printemps (environ 0,030 secondes en mai), et à retarder en automne (0,029 secondes en octobre). Ils en viennent à penser que ce ne sont pas les horloges qui sont en cause mais que la Terre présente une irrégularité saisonnière de sa vitesse de rotation. Ceci a été confirmé après 1955 avec l'apparition des horloges atomiques, encore plus régulières que les horloges à quartz. Ces variations saisonnières sont attribuées au déplacement des masses d'air (fig4).

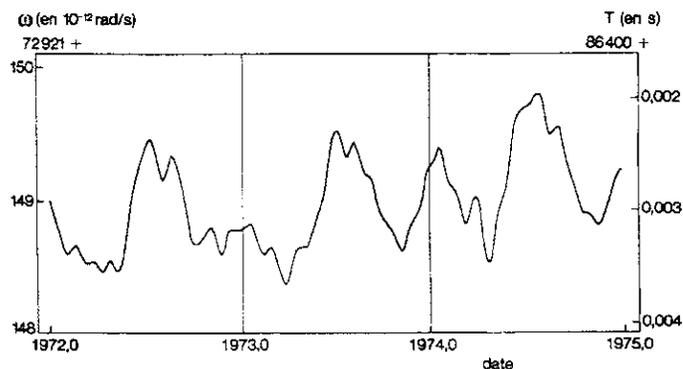
Depuis 1962, on utilise une correction pour avoir une connaissance plus fiable de UT :

$$UT_2 = UT_1 + \Delta T$$

avec ΔT exprimé en secondes

$$\Delta T = 0,022 \sin(2\pi t) - 0,012 \cos(2\pi t) - 0,006 \sin(4\pi t) + 0,007 \cos(4\pi t)$$

figure 4



Variations saisonnières de la vitesse instantanée de la rotation terrestre ω et donc de la durée du jour T (d'après l'Encyclopédie du Bureau des Longitudes).

et t est la fraction écoulée de l'année depuis le 1er janvier (formule confirmée par le Bulletin IERS du 24 juin 1997, Volume X, n°33). Le défaut de régularité de UT_2 est 10^{-7}

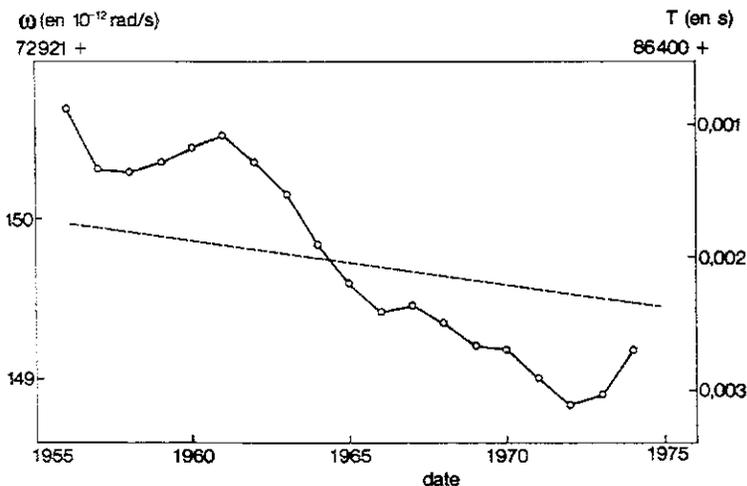
4 - D'autres variations

Par la suite, on a mis en évidence des variations périodiques, d'origine solaire et lunaire et, plus ennuyeux, des variations irrégulières qui n'ont pas de causes bien connues.

On pense à des mouvements du magma et à des phénomènes de couplage entre le noyau et le manteau terrestre qui perturberaient la rotation du manteau. Ces circonstances pourraient modifier le moment d'inertie de la Terre et influencer la durée de rotation.

Les variations irrégulières peuvent augmenter ou diminuer la durée du jour de 0,005 secondes. Il est impossible d'améliorer le UT, son uniformité ne dépasse pas 10^{-7} (fig. 5 ; 6 ; 7, d'après l'Encyclopédie du B.D.L.).

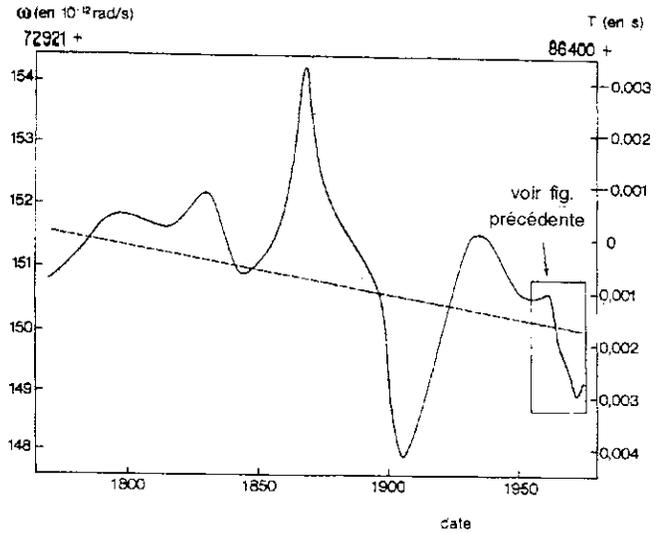
figure 5



Évolution de la vitesse de rotation de la Terre et de la durée du jour sur 20 ans, entre 1955 et 1975. La droite en pointillé correspond au ralentissement séculaire moyen

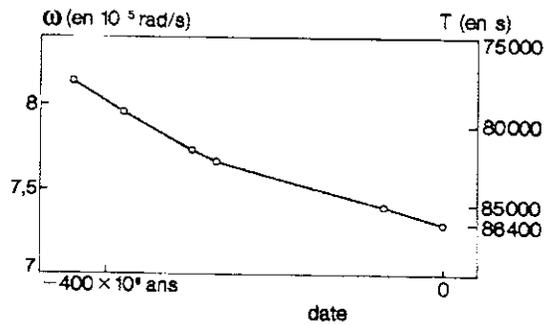
Figure 6

Évolution à long terme de la vitesse de rotation de la Terre et de la durée du jour obtenue par l'étude des mouvements orbitaux des planètes et de la Lune



Une conclusion s'impose : la rotation de la Terre sur elle-même n'est pas uniforme, les corrections que l'on a cherché à introduire pour conserver la rotation de la Terre de manière à définir une échelle de temps ont des composantes aléatoires : le Temps Universel qu'on en déduit ne présente pas la régularité nécessaire à une échelle de temps. Il faut abandonner le mouvement de la Sphère Céleste comme référence pour le repérage précis du temps.

Figure 7



Évolution de la vitesse de rotation de la Terre et de la durée du jour dans les temps géologiques d'après Stoyko.

5 - Le bureau International de l'Heure (BIH)

Après 1955, une nouvelle échelle de temps, le temps atomique, est à la disposition de l'astrométrie. Le temps atomique, plus uniforme que le temps universel va permettre d'étudier finalement les irrégularités de UT. Par synthèse des mesures mondiales, on sait que UT_2 , obtenu par des mesures astrométriques présente des erreurs multiples dues à la mauvaise connaissance de la longitude de l'observatoire, à des erreurs systématiques instrumentales ou personnelles, à l'incerti-

tude sur la position des étoiles, à cause de l'inhomogénéité de l'atmosphère qui aboutit à des réfractions mal connues. Aussi il n'est pas rare que les valeurs de UT provenant de différents observatoires soient décalées de plus de 50 millisecondes. Les mesures, effectuées en de nombreux points du globe, étaient centralisées à Paris, par le BIH qui après avoir effectué des traitements aux valeurs brutes, publiait la valeur officielle de UT sous forme de circulaires mensuelles avec un mois de retard sur les observations.

Ainsi, l'heure était connue à 0,001s près. Le BIH n'existe plus.

Il a été scindé en deux services : l'un rattaché au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) en 1985, l'autre est devenu le Bureau Central du Service International de Rotation de la Terre (BC / SIRT) qui siège à Paris. Actuellement, le travail de la détermination des temps liés au Temps Universel: UT , UT_1 , UT_2 est confié au BC / SIRT. La détermination se fait toujours à partir de l'observation du passage dans le méridien d'étoiles de références avec des lunettes méridiennes. Cela se faisait à Besançon jusque dans les années 70, cela se fait encore dans de nombreux observatoires dont Bordeaux ! ■