

# Le temps au XX<sup>e</sup> siècle

Françoise Suagher

ARTICLE DE FOND

Après nous avoir explicité les irrégularités du Temps universel (CC n°82), Françoise nous aide à comprendre pourquoi le Comité International des Poids et Mesures a adopté puis abandonné le Temps des éphémérides et fini par choisir le Temps atomique international.

## IV - Le Temps des éphémérides, TE.

### 1 - Une nouvelle échelle de temps basée sur le mouvement orbital de la Terre.

Afin de pallier les défauts d'uniformité de UT, on décide de définir une nouvelle échelle de temps à partir du mouvement orbital de la Terre selon Newcomb, et de déterminer le temps d'après le mouvement en longitude du Soleil. Le TE est ainsi affranchi des irrégularités de la rotation de la Terre. La longitude moyenne du Soleil s'exprime sous la forme d'un polynôme du second degré de la variable  $t$  auquel il a été nécessaire de rajouter un terme correctif. En utilisant les observations du Soleil de 1680 à 1895, Newcomb a déterminé les valeurs des coefficients du polynôme.

On a :  $L = 279^\circ 41' 27,54'' + 129\,602\,768,13'' T + 1,089'' T^2 + \Delta L$ .  
On mesure  $L$  et on résout l'équation du second degré pour trouver  $T$ . (Si vous ne saviez pas à quoi servait  $b^2 - 4ac$ , en voici une belle application...)

La mesure pratique de  $L$  est donnée par le mouvement en longitude de la Lune. En fait, on effectue une photographie simultanée de la Lune

et des étoiles environnantes, et pour supprimer le mouvement de la Lune pendant la pose, on le compense par la rotation d'une lame à faces parallèles. On en déduit les coordonnées de la Lune, puis on calcule la longitude du Soleil.

### 2 - Une nouvelle unité de temps : la seconde des éphémérides.

La seconde des éphémérides va remplacer la seconde UT. Le processus d'adoption de la nouvelle seconde est très complexe. Il montre qu'il n'est pas facile de changer la définition d'un étalon. Rappelons les différentes étapes.

En 1950, la Conférence Internationale des Constantes Fondamentales de l'Astronomie fait des propositions qui sont soumises en 1954 à la X<sup>e</sup> conférence des Poids et Mesures. Cette conférence charge le Comité International des Poids et Mesures de décider. Ce comité prend, en 1956, la décision d'adopter comme unité de temps la seconde des éphémérides qui est la fraction  $1 / 31\,556\,925,974\,74$  de l'année tropique qui a commencé le 0 janvier 1900 à 12h TE (ou le 31 décembre 1899 à 12h TE) et qui a duré  $365,242\,198\,8$  jours solaires moyens. La seconde de Temps Universel était la fraction  $1 / 86\,400$  du jour solaire moyen).

Ces deux secondes ont la même durée (c'est voulu) mais deux années différentes n'en comportent pas le même nombre car elles n'ont pas la même durée.

Cette définition a été entérinée par la XI<sup>e</sup> Conférence des poids et mesures en 1960 ; puis rendue légale en France par le décret du 3 mai 1961 sur les unités légales de mesure. Que de réunions, que de discussions : 11 ans pour officialiser la nouvelle définition !

L'emploi de la seconde de TE n'était qu'une étape provisoire, car la détermination exacte de cette unité (malgré les 14 chiffres significatifs de la définition) comportait beaucoup d'erreurs, dues en particulier à la difficulté des observations et à l'insuffisance de la "Théorie du mouvement de la Lune" qui servait aux observations réelles. Le défaut d'uniformité du TE est de l'ordre de  $10^{-9}$ . Il ne faut donc pas s'étonner que les physiciens recherchent un nouvel étalon de temps.

### 3 - L'écart $\Delta T$ entre TE et UT

La connaissance de l'écart entre TE et UT est le souci majeur de l'astrométrie. On le détermine à partir d'événements non liés à la rotation de la Terre comme par exemple l'occultation des étoiles par la Lune ou par des phénomènes planétaires dans lesquels la position de l'observateur n'intervient pas.

On pourrait aussi utiliser le Soleil, mais sa grande luminosité, sa structure gazeuse, sont des contre-indications. Les valeurs obtenues avec la Lune sont plus précises du fait que le mouvement de la Lune est treize fois plus rapide que celui du Soleil. De plus, comme c'est l'astre le plus rapproché de la Terre, les astronomes sont en mesure d'observer de très nombreuses inégalités de son mouvement qui passeraient inaperçues pour des

astres plus lointains. Les observations de la Lune sont pratiquement l'unique moyen de déterminer l'écart  $\Delta T = TE - UT$ . Une telle détermination nécessite une théorie de la Lune la plus précise possible, ce qui justifie les efforts faits en vue de l'amélioration des théories existantes.

La valeur exacte de  $\Delta T$  n'est connue qu'a posteriori, par comparaison entre les coordonnées observées de la Lune et les coordonnées calculées. L'écart entre TE et UT est bien connu de 1850 à nos jours. Pour le connaître sur des périodes plus longues, on a utilisé d'autres méthodes. Depuis 1620, on utilise des occultations d'étoiles qui ont l'avantage d'être des phénomènes quasi instantanés ou des observations comme les passages de Mercure ou Vénus devant le disque solaire.

évalue que l'accroissement du TU pour un jour est en moyenne de 0,001 64 seconde par siècle, et que le cumul depuis l'ère chrétienne atteint 3 heures.

Pour des époques antérieures à 1710, une valeur de  $\Delta T$  en minutes peut être calculée de manière approchée par la relation :  $\Delta T = 0,41 + 1,205 3 T + 0,499 2 T^2$  où T est le temps en siècle à partir de 1900.

Avec une éclipse observée en 135 avant notre ère, on trouve  $\Delta T$  compris entre 3,13 et 3,38 heures et la formule ci-dessus donne 3,04 heures.

Exemple 1 : position de Mercure le 6 février à 6 h UT de l'an - 555.

On a  $T = - 24,55$  ;  $\Delta T = 272$  min.  
 $TE = 6h + 272 \text{ min} = 10 \text{ h } 32$ ,

Tableau donnant les valeurs de  $\Delta T$  en minutes depuis 170

1710	-0,2	1903	0
1730	-0,1	1912	+0,2
1750	0	1927	+0,4
1770	0	1940	+0,4
1800	+0,1	1950	+0,5
1840	0	1965	+0,6
1870	0	1971	+0,7
1880	-0,1	1977	+0,8
1895	-0,1	1987	+1

On notera que l'écart entre TE et UT s'est annulé plusieurs fois. On retrouve ces résultats sur le tableau ci-contre. On remarque que  $\Delta T$  varie de façon très chaotique. La vitesse de rotation de la Terre diminue, donc la durée des jours augmente, les jours réels sont plus longs que les jours calculés, le TE a pris en 70 ans, entre 1900 et 1970, 38 secondes d'avance sur le TU et en 1974 on avait :  $\Delta T = TE - UT = 44 \text{ s}$  (0,74 minutes).

Pour l'Antiquité, on a recours aux éclipses. Dans le cas des éclipses observées il y a quelque 2000 ans, les différences entre sites d'observation théoriques et réels sont de l'ordre de quelques dizaines de degrés en longitude et ceci correspond au retard accumulé par la rotation terrestre au cours des siècles, car des différences aussi grandes ne peuvent pas être imputées à des imperfections dans la théorie des mouvements célestes. Spencer Jones

donc, dans les équations du mouvement on doit prendre la date 6 février - 555 à 10 h 32 TE.

Exemple 2 : phase maximale de l'éclipse de Lune du 4 avril 1977 à 4 h 19,0 min TE. On a  $\Delta T = 0,8$  min en 1977, donc  $UT = 4 \text{ h } 19,0 \text{ min} - 0,8 \text{ min} = 4 \text{ h } 18,2 \text{ min}$ .

## V - L'échelle de Temps atomique international (TAI) et la seconde TAI.

### 1 - La seconde de Temps atomique

A peine née, la seconde des éphémérides est moribonde. Peu après l'adoption du TE, le Comité International des Poids et Mesures constitue un groupe d'experts : le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS), chargé de suivre l'évolution des recherches pouvant conduire à une nouvelle définition de la seconde, et de l'informer. L'idée d'utiliser des effets atomiques pour mesurer le temps remonte à 1945 (Rabi) et en 1955, les physiciens Essen et Parry réalisent le premier étalon atomique à l'aide d'un maser à césium 133 à 9 GHz. C'est le point de départ des étalons de temps à césium. Le CCDS s'est réuni 4 fois, en 1957, 1961, 1963, 1967. A la session de 1967, il a recommandé d'adopter une définition de la seconde à partir d'une transition atomique du césium. Cette proposition a été suivie par le Comité International des Poids et Mesures, puis par la XIII<sup>e</sup> conférence des Poids et Mesures, qui, en octobre 1967 adopte un nouvel étalon de temps : la seconde atomique. La seconde du système international est une durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant entre les deux niveaux hyperfins  $F_4$  à  $MF_0$  de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

### 2 - L'échelle TAI

Pour l'utilisateur qui dispose d'une horloge atomique, la précision est de l'ordre de la nanoseconde, et par comparaison des différentes horloges atomiques du monde entier, on gagne encore en uniformité. L'élaboration du Temps atomique international TAI a été confiée pendant plus de

quinze ans au BIH (Bureau international de l'heure) qui regroupait 24 pays, une cinquantaine de laboratoires et environ 150 horloges comparées entre elles régulièrement.

En 1997 le TAI est élaboré à partir de 223 horloges atomiques, installées dans 38 pays. Ce n'est pas une simple moyenne qui est effectuée, la pondération des horloges présentant les plus gros défauts d'uniformité est amoindrie. L'écart entre le TAI et le TAF (Temps atomique français) est lentement variable. En 1997 il vaut environ 163  $\mu$ s.

Le Temps atomique n'est pas diffusé, mais avec une précision de  $2 \times 10^{-14}$ , son uniformité surpasse de beaucoup celle des échelles de temps astronomiques. Le gain en uniformité en 1997, avec emploi du TAI est de  $10^7$  par rapport au UT et de  $10^5$  par rapport au TE. Pendant les dix dernières années, la précision augmenta d'un facteur 100. L'échelle de Temps atomique international a été introduite officiellement le 1<sup>er</sup> janvier 1972. TAI coïncidait approximativement avec UT le 1<sup>er</sup> janvier 1958. Son origine a été choisie pour conserver une continuité avec les précédentes échelles de temps, Temps des éphémérides et Temps universel (UT2). De ce fait, on a actuellement :  $TE = TAI + 32,184$  s (circulaire IERS de juin 1997).

### 3 - Usage du TAI

Le TAI est utilisé comme échelle de temps uniforme. Il permet les études théoriques des mouvements des satellites, il sert au lissage du TE, il est utilisé dans les calculs des éphémérides des planètes à la place de UT.

## VI - Compléments

### 1 - Quelques comparaisons

La précision d'une pendule est d'un dixième de seconde par jour,

donc de l'ordre de  $10^{-6}$ , celle d'une horloge à quartz est de l'ordre de  $10^{-9}$ . Celle des horloges atomiques atteint maintenant  $10^{-14}$ . Il faut environ 1 000 000 ans pour qu'une horloge atomique accumule un retard d'une seconde... La précision atteinte est telle que cela pose des problèmes relativistes.

### 2 - Le Temps universel coordonné

Après avoir défini une unité de temps grâce aux étalons atomiques, et d'une façon totalement indépendante de la rotation de la Terre, il est nécessaire de conserver une échelle concordante avec les cycles diurnes, les activités spatiales, la navigation, les observations terrestres.

On utilise un temps déduit de l'observation astronomique par l'intermédiaire d'une convention opportune, analogue à la convention des années bissextiles et qui porte le nom de UTC, temps universel coordonné. Il s'agit d'une simple renumérotation des secondes d'un rang en avant ou en arrière selon l'avance ou le retard accumulé par la rotation terrestre à cette date. Le temps universel coordonné a la même unité que le TAI mais il est réajusté parfois d'une seconde de telle façon que l'écart entre  $UT_1$  et UTC, en valeur absolue, soit inférieur à 0,9 seconde (fig.8).

Cette correction ne peut être connue qu'a posteriori à partir des résultats des observations des Services de l'Heure. Elle est positive ou négative. La correction est opérée de préférence le 30 juin 1997 à 24 heures UT, soit le 1<sup>er</sup> juillet 1997 à 2 heures légales en France.

La succession des secondes a été la suivante :

30 juin 1997 23h 59 min 59 s ;  
30 juin 1997 23h 59 min 60 s ;  
1<sup>er</sup> juillet 1997 0 h 0 min 0 s.

Du 1<sup>er</sup> janvier 1997 au 30 juin 1997, on avait TAI - UTC = 30 s, et à partir du 1<sup>er</sup> juillet, et il y a maintenant 31 secondes (circulaire T 115 du BIPM en date du 12 août 1997).

Le UTC est ce que l'on sait faire de mieux comme échelle de temps directement accessible. Il est la base des temps légaux. Il permet d'avoir le UT<sub>1</sub> avec une précision suffisante pour les besoins courants. Les valeurs UT<sub>1</sub> - UTC, déduites des observations sont connues depuis 1984 à 0,1 milliseconde près et sont publiées par le Service International de la Rotation Terrestre (IERS = International Earth Rotation Service)

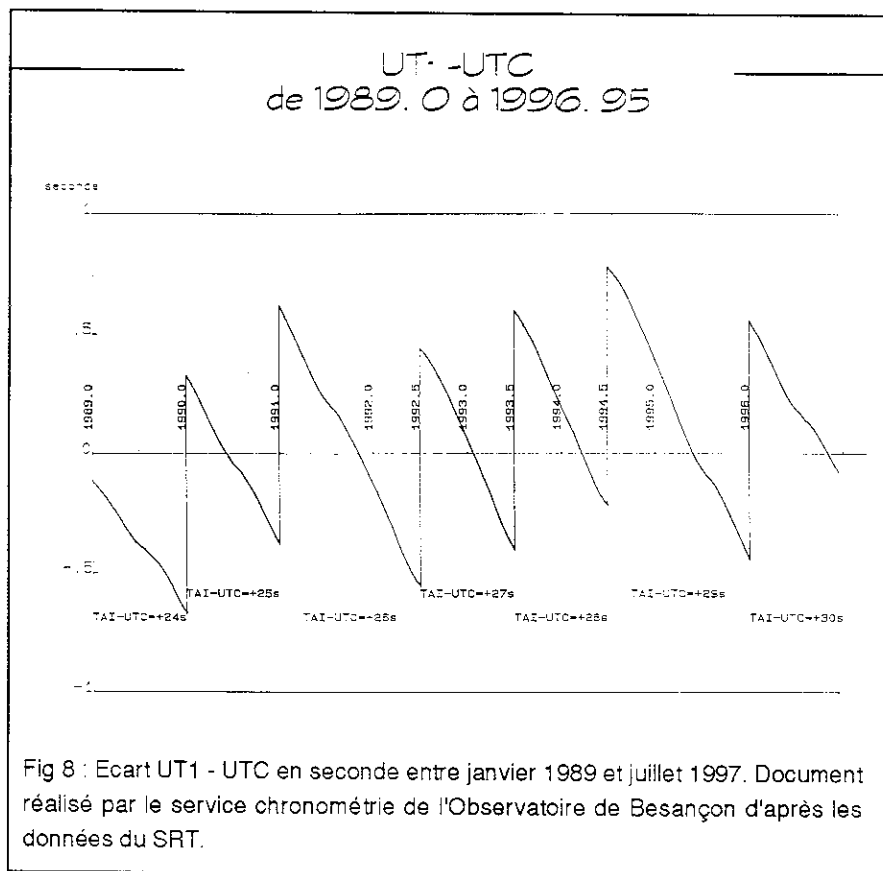
Du 1<sup>er</sup> janvier au 30 juin 1997 on avait UT<sub>1</sub> - UTC = - 0,47379 et, depuis le 1<sup>er</sup> juillet, et jusqu'à nouvel ordre, on a UT<sub>1</sub> - UTC = + 0,52486. On remarque que la nouvelle valeur ne s'obtient pas à partir de l'ancienne en ajoutant une seconde.

Le Service de l'Heure a profité de la correction d'une seconde pour recalibrer le UTC et l'horloge Terre.

Le système de satellites GPS (Global Positioning System) diffuse un temps égal au TAI, mais avec 19 secondes de retard. Depuis la création du GPS, on a TAI - GPS = 19 s. Par contre, l'écart avec UTC suit les sauts de l'échelle de temps. Jusqu'au 1<sup>er</sup> juillet 1997 on avait UTC - GPS = - 11 s et à partir du 1<sup>er</sup> juillet, l'écart est passé à - 12 s. Cet écart surprenant de presque 20 secondes avec TAI correspond à l'écart qui existait entre les deux échelles de temps TAI et UTC au moment de la première diffusion du GPS.

### 3 - L'argument des éphémérides astronomiques

En 1976, l'UAI a recommandé de remplacer à partir de 1984, l'échelle de temps des éphémérides



des TE par une unité proche du TE dont l'unité fondamentale est la seconde SI (atomique) et qui s'obtient pratiquement en ajoutant 32,184 secondes au TAI.

### 4 - Le temps dynamique

Pour certaines activités astronomiques de pointe, le temps des éphémérides est déjà dépassé, et on utilise le TDT ou le TDB. Le TDT (Terrestrial Dynamical Time ou TT) est utilisé comme échelle de temps pour les observations depuis la Terre. C'est TAI + 32,184 s. TDB est le Barycentric Dynamical Time, utilisé comme échelle de temps pour les éphémérides ramenées au barycentre du Système Solaire.

$$\text{TDB} = \text{TDT} + 0,001\,658 \times \sin(g) + \dots$$

En 1997, on a  $\text{UT} = \text{TD} - 63 \text{ s}$

La plupart du temps, le TDT peut être considéré comme la suite du TE (à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1984) et l'ensemble forme une échelle continue.

### 5 - Vers l'abandon de UT ?

UT est tellement irrégulier, tellement impropre aux théories mécaniques, ne va-t-on pas se décider à l'abandonner définitivement ? A quoi cela peut-il bien servir de continuer à le diffuser ? La réponse est simple : son abandon signifierait la déconnexion de l'observateur d'avec la Terre et le ciel. Sans lui, un observateur ne peut plus situer le Soleil et les étoiles, le point en mer ne donne plus un résultat correct. Par ailleurs, la comparaison de UT et de TAI permet a posteriori de connaître le mouvement du pôle. Il a comme sous-produits l'amélioration des catalogues d'étoiles et des constantes astronomiques, et il donne l'accès à des données expérimentales sur la dérive des continents par exemple.

## VI - Réduction des échelles de temps

Pour passer d'une échelle de temps à l'autre, il est nécessaire de connaître un certain nombre de formules que l'on trouve par exemple dans la Connaissance des Temps. Les formules permettent de passer d'une échelle de temps à une autre pour une période déterminée. Elles ne sont pas toujours simples.

Exemple 1 :

Du 1<sup>er</sup> janvier 1996 au 1<sup>er</sup> février 1998 on a :

$$\text{TAI} - 32,184 \text{ s} - \text{UTC} =$$

$$36,497\ 170\ 0 \text{ s} + (\text{JD} - 2\ 439\ 125,5) \times 0,002\ 592$$

JD (Julian Day) représente le jour julien. Il incrémente d'une unité chaque jour à midi ; et l'origine est le premier janvier - 4712 à midi. Le 1<sup>er</sup> janvier 2000 à 0 heure on aura  
JD = 2 451 544,5

Exemple 2 :

Après 1972, la formulation est plus simple après l'adoption du TAI :

du 1<sup>er</sup> juillet 1993 au 1<sup>er</sup> octobre 1993 on a :

$$\text{TAI} - 32,184 \text{ s} - \text{UTC} = 53,184\ 000\ 0$$

et pour la même période on a  $\text{TU}_1 - \text{UTC} = + 0,60$ .

Les corrections varient en fonction de la date, en suivant les "hoquets" de la Terre.

## Conclusion

Une telle précision dépasse de loin les utilisations que l'homme de la rue peut en faire. Mais pour les plus puristes d'entre nous, une bonne précision dans la transmission de l'heure est actuellement à la portée de tous, par l'intermédiaire de l'émetteur allemand DCF - 77, situé à Mainflingen, près de Frankfurt am Main, en Allemagne et qui diffuse l'heure légale. La communication de l'information horaire est en Grandes Ondes sur 77,5 kHz. L'émetteur ayant une puissance de 25 kW, le signal peut être capté dans un rayon de 1500 à 2500 kilomètres, suivant le relief.

On trouve dans le commerce des petits réveils radiopilotés, remis à l'heure d'une horloge atomique à chaque heure. Leur coût est inférieur à 300 F. La métrologie du temps a des implications importantes en navigation, mais aussi dans les industries de précision, car, depuis 1983, elle est liée aux longueurs par la vitesse de la lumière dans le vide. L'industrie aéronautique de construction et les réseaux de télécommunications sont des gros utilisateurs de nano et de picosecondes. ■