

# Les échelles de temps :

## I- Rotation et révolution de la Terre

La rotation de la Terre autour de son axe définit le jour et la révolution de la Terre autour du Soleil définit l'année.

Pour définir parfaitement le mouvement de la Terre autour de son axe, il faut connaître :

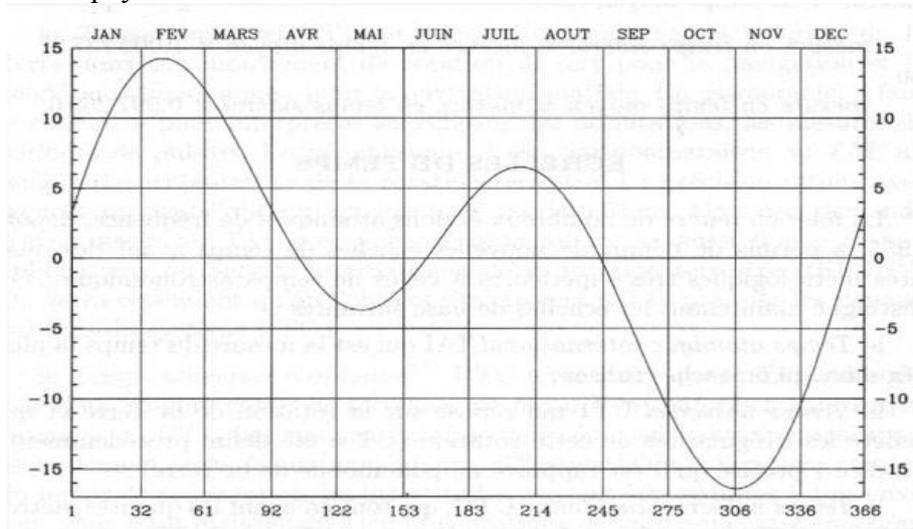
- le mouvement de l'axe de la Terre par rapport à l'"extérieur" (c'est-à-dire par rapport à un référentiel inertiel); c'est ce mouvement qui définit le mouvement de l'équateur céleste et la modification des coordonnées (passage de l'équateur instantané (« de la date ») à un équateur de référence (par exemple l'équateur « J2000 » correspondant à l'équateur au 1 janvier 2000 à 12h);
- le mouvement de l'axe de rotation de la Terre par rapport à la Terre elle-même (le mouvement du pôle par rapport à l'axe d'inertie): il est très petit puisque le pôle reste dans un cercle d'une vingtaine de mètres mais ce mouvement est imprévisible;
- le mouvement de la Terre autour de son axe de rotation : c'est évidemment le plus important qui va définir la notion de jour. Il s'exprime par la variation d'un angle compté par rapport à une direction fixe: le temps sidéral.

### 1) Définition du jour

Si on considère une direction fixe dans l'espace, il faudra 23h 56m 4s à un observateur pour la retrouver dans la même direction après un tour complet de la Terre autour de son axe. Mais ce n'est pas cette durée qui est perceptible. On aura beaucoup plus l'impression que la Terre a accompli un tour si c'est le Soleil qui revient à la même position. C'est ce retour du Soleil dans la même direction qui définit le jour moyen qui lui, dure en moyenne, 24 heures parce que le Soleil a changé de position apparente durant ce jour (la Terre a avancé sur son orbite). Le jour n'est pas, a priori, une simple unité de temps pour compter des durées, mais c'est plutôt un intervalle de temps centré sur une période de "jour" et encadré par des périodes de "nuit". Nous allons donc définir le jour comme la durée qui sépare deux passages consécutifs du Soleil à son point culminant, c'est-à-dire au "méridien" du lieu.

Une telle durée est variable : pourquoi ? Tout d'abord, du fait des lois de Kepler, l'orbite apparente du Soleil autour de la Terre (en fait, l'orbite réelle de la Terre autour du Soleil) n'est pas un cercle mais une ellipse : ainsi la vitesse apparente du Soleil sur la sphère céleste va varier selon sa position sur sa trajectoire. Le Soleil passera donc au méridien soit en avance quand il va plus vite, soit en retard quand il ralentit, par rapport à une position moyenne. Pour que nos heures soient régulières et que midi n'arrive pas un peu en avance ou un peu en retard, on construit une position moyenne théorique du Soleil qui définira le Temps solaire moyen, échelle de temps qui a été en usage jusque dans les années 1970. La définition officielle de cette échelle de temps était : "l'heure légale en France est le temps solaire moyen de Paris retardé de 9m 21s et augmenté de douze heures (c'est la définition du Temps universel internationalement reconnu) et aussi augmenté d'une heure en été et de deux heures en hiver (c'est l'heure d'été ou l'heure d'hiver)". Le retard de 9m 21s sert à nous mettre à l'heure du

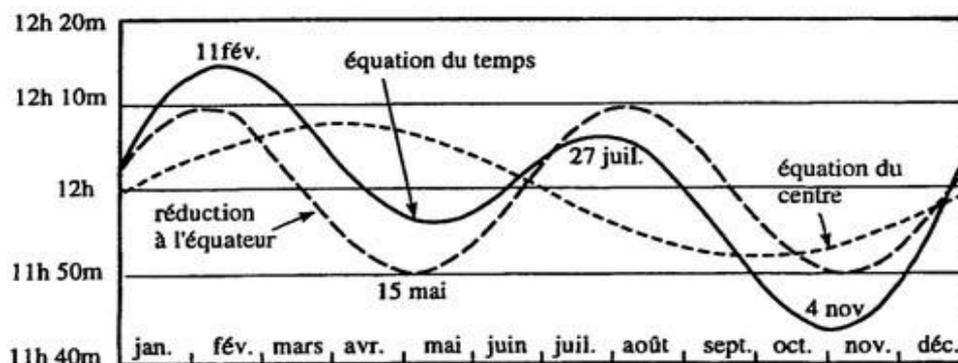
méridien international (Greenwich), l'avance de douze heures sert à faire commencer le jour à minuit (c'est plus pratique car le temps moyen fait débuter le jour à midi au moment du passage du Soleil au méridien) et enfin le décalage d'une heure ou de deux heures nous donne l'heure d'été ou l'heure d'hiver. Les fuseaux horaires sont là pour permettre un décalage similaire pour les pays situés loin du méridien international.



*Equation du temps (en minutes) pour 1999 Crédit : IMCCE/BDL*

## 2) Temps solaire vrai, temps solaire moyen, équation du temps

Le Temps solaire vrai en un lieu et à un instant donné, est l'angle horaire du Soleil en ce lieu à cet instant. C'est lui qui est indiqué par les cadrans solaires. Il est, bien entendu, affecté par la non-uniformité de la rotation de la Terre autour du Soleil et est relié au Temps solaire moyen par la relation Temps solaire vrai = Temps solaire moyen - équation du temps. C'est cette différence entre le Soleil moyen et le Soleil vrai -i.e. l'équation du temps- qui nous fait dire en janvier : "tiens, les jours rallongent plus le soir que le matin". En fait, c'est le midi vrai qui se déplace et arrive de plus en plus tard par rapport au midi moyen. Cet écart entre le midi moyen et le midi vrai est évidemment fondamental lorsque l'on construit un cadran solaire qui lui, va donner le temps vrai du lieu. Cette différence est appelée "équation du temps". Elle atteint 16 minutes au maximum fin octobre.



$$\text{Équation du Temps} = \text{équation du centre} + \text{réduction à l'équateur}$$

$$\text{Temps solaire vrai} = \text{temps solaire moyen} - \text{équation du temps}$$

L'équation du temps est en fait la résultante de deux effets : - l'équation du centre due à l'excentricité de l'orbite terrestre (la trajectoire de la Terre elliptique et non circulaire) - la réduction à l'équateur due à l'obliquité de l'écliptique (la Terre ne tourne pas dans son plan équatorial autour du Soleil) puisque l'on mesure le passage du Soleil au méridien du lieu par rapport au plan équatorial terrestre dans lequel il faut donc le ramener. Ainsi, l'équation du temps donne le nombre de minutes après le midi moyen pour que l'on soit au midi vrai. Exemple: si l'équation du temps est égale à +8 minutes, alors il sera midi vrai à 12h 8m du temps moyen. Plus simplement, disons que la Terre tourne autour de son axe dans le plan de l'équateur et autour du Soleil dans le plan de l'écliptique. C'est l'avance (ou le retard) du Soleil, par rapport à un mouvement uniforme dans l'écliptique, qui doit se projeter sur l'équateur.



*Concrétisation de l'équation du temps dans le ciel de Crimée  
(Crédit: V. Rummyantsev/observatoire de Naucsny)*

*L'image ci-dessus montre l'effet de l'équation du temps. On a superposé des images du Soleil prises de 10 jours en 10 jours le matin à la même heure.*

### **3) Les échelles de temps**

La rotation diurne de la Terre autour de son axe a longtemps semblé suffisamment uniforme pour servir de base à l'échelle de temps utilisée par les astronomes et appelée Temps universel (UT). Dans cette échelle de temps, la seconde est définie comme étant égale à  $1/86400$  du jour solaire moyen. Mais on s'est aperçu que la Terre ralentissait en constatant, par exemple, que la Lune s'éloignait de la Terre d'une manière qui n'était pas en accord avec les calculs théoriques. L'erreur ne provenait pas de ces calculs, mais du fait que le Temps universel n'était pas une échelle de temps uniforme: la Terre ralentissait dans sa rotation autour de son axe, la durée du

jour moyen augmentait (seulement de quelques millisecondes par siècle, mais qui se cumulent) et donc la durée de la seconde augmentait elle aussi. Une telle échelle de temps non uniforme ne gênait nullement la datation des événements mais ne permettait pas le calcul des durées avec une bonne précision. Pire, cette échelle de temps ne pouvait être utilisée pour la détermination des mouvements des astres du système solaire, ces calculs nécessitant une échelle de temps uniforme. Avec le Temps solaire moyen comme échelle de temps, tous les astres semblaient accélérer alors qu'en fait c'est la Terre qui ralentissait !

Les astronomes ont alors introduit une nouvelle échelle de temps, plus stable, fondée sur la révolution de la Terre autour du Soleil, appelé Temps des éphémérides (TE). La durée de l'année n'est cependant pas vraiment stable non plus, le TE n'a été utilisé que quelques années et on a choisi d'utiliser une échelle de temps construite différemment : on fabrique, à l'aide d'horloges atomiques (mesurant les fréquences des atomes), une "seconde" particulièrement stable. On va alors cumuler ces secondes les unes derrière les autres pour fabriquer une échelle de temps, le Temps atomique international (TAI) indépendant des mouvements célestes. Le Temps atomique international est une moyenne des horloges atomiques réparties dans le monde. Les choses se compliquent du fait que les effets relativistes montrent que cette seconde dépend du repère où l'on se place : on arrive là à un niveau de précision très élevé et les solutions pour utiliser ces échelles de temps sont d'autant plus complexes que l'on souhaite une précision élevée. Pour la détermination des mouvements des planètes, l'utilisation d'une échelle de temps calée sur le TAI est suffisante, les effets relativistes ne devant être pris en compte que pour les observations radar ou similaires. Il est à noter que la seconde choisie comme étalon de base pour les horloges atomiques vient de l'astronomie : elle est égale à  $1/86400$  du jour solaire moyen au 1 janvier 1900, ce qui n'est pas très heureux, ce choix prenant effet vers 1960, alors que la seconde avait augmenté. L'utilisation du Temps atomique international, très stable, va entraîner un décalage avec la rotation de la Terre et il faudra recalibrer cette échelle de temps régulièrement pour que midi reste à midi... C'est pour cela que l'on annonce de temps en temps qu'une seconde va être ajoutée le 31 décembre ou le 30 juin, selon les variations de la rotation de la Terre, pour que l'échelle de temps usuelle ne s'écarte pas de plus d'une seconde du temps astronomique qu'est le Temps universel. Cette échelle de temps atomique modifiée par l'ajout régulier d'une seconde s'appelle le Temps universel coordonné (UTC). L'échelle de temps stable et uniforme employée pour les calculs astronomiques est maintenant le Temps terrestre (TT), échelle de temps dont la réalisation pratique est liée au Temps atomique international, et qui prolonge le Temps des éphémérides à partir du 1 janvier 1972.

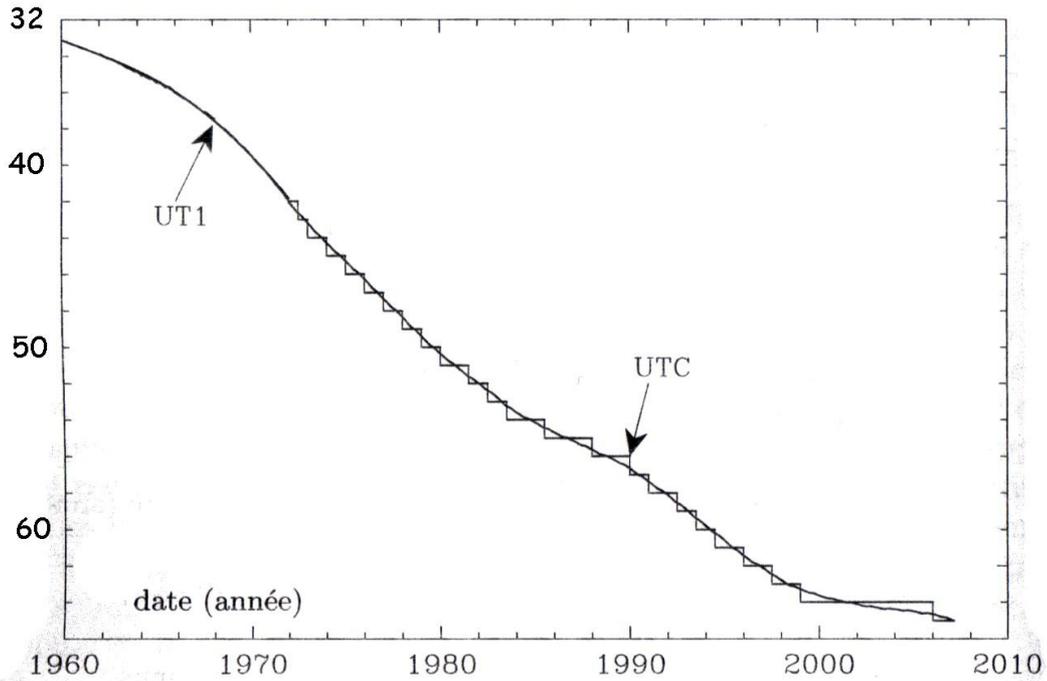
Plus concrètement, les échelles de temps sont liées entre elles comme suit. Le Temps atomique international (TAI) est l'échelle de temps la plus uniforme possible: elle est fabriquée et ne repose sur aucun phénomène astronomique. C'est une échelle de temps fondée sur la physique.

Le Temps universel est une échelle de temps non uniforme qui suit la rotation de la Terre: il est noté UT1, c'est une fonction linéaire de l'angle de rotation de la Terre. Il n'est pas prédictible dans la mesure où le ralentissement de la rotation de la Terre n'est pas régulier (voir figure). Il est déterminé a posteriori à l'aide des observations. Le Temps universel coordonné (UTC) est un temps calé sur le TAI, uniforme "par morceaux", c'est à dire qu'il a les qualités métrologiques du TAI mais qu'il suit UT1 sans s'en écarter de plus d'une seconde. Il est donc recalé si nécessaire d'une seconde (voir figure).

On a la relation  $TAI - UTC = \text{nombre entier de secondes}$ .

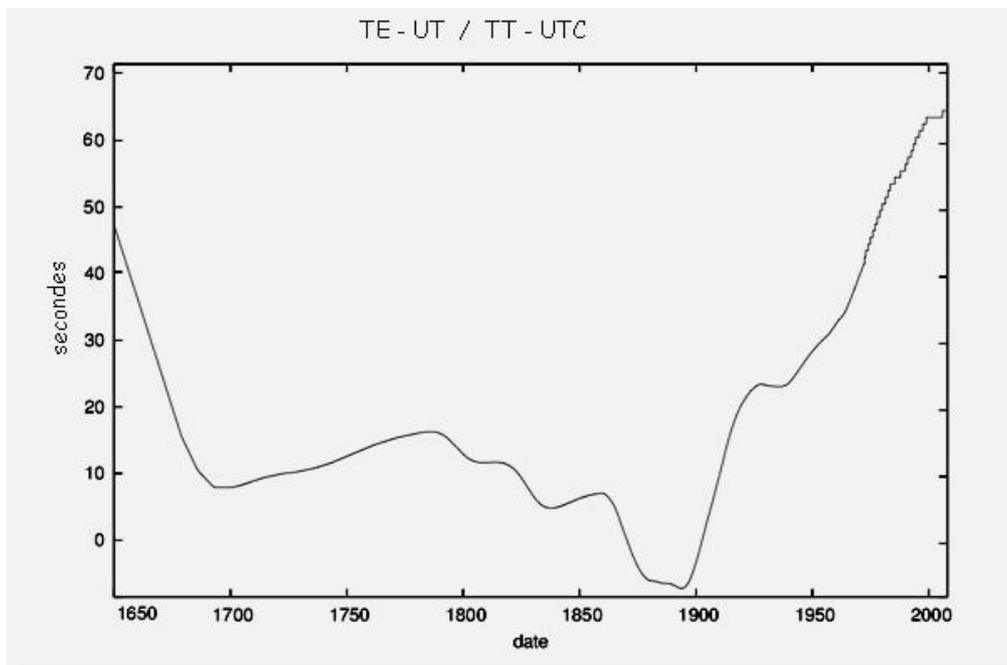
Le Temps des éphémérides (TE) est plus uniforme et a été créé pour prolonger le Temps universel dès qu'on s'est rendu compte de sa non uniformité. A partir du 1 janvier 1972, le TE est prolongé par le Temps terrestre (TT), calé sur TAI avec la relation  $TT = TAI + 32,184 \text{ s}$ . Ce décalage de 32,184 s provient d'un manque de coordination entre astronomes et physiciens lors de la création de l'échelle TAI en 1955. C'est la relation TE-UT ou TT-UTC qu'il est important de connaître puisque les observations sont réalisées en UTC accessible dans tous les observatoires et que les modèles dynamiques sont réalisés dans une échelle de temps uniforme, le TT. La table suivante donne la correspondance entre le TT et UTC sous forme de la différence TT-UTC (qui étaient : TE - UT1 avant 1972). L'ajout d'une seconde se fait soit le 31 décembre, soit le 30 juin à 23h 59m 60s, noté en général à tort 1 janvier ou 1 juillet.

<b>Intervalle de validité</b>	<b>TT - UTC</b>
1 janvier 1972 - 1 juillet 1972	42,184s
1 juillet 1972 - 1 janvier 1973	43,184s
1 janvier 1973 - 1 janvier 1974	44,184s
1 janvier 1974 - 1 janvier 1975	45,184s
1 janvier 1975 - 1 janvier 1976	46,184s
1 janvier 1976 - 1 janvier 1977	47,184s
1 janvier 1977 - 1 janvier 1978	48,184s
1 janvier 1978 - 1 janvier 1979	49,184s
1 janvier 1979 - 1 janvier 1980	50,184s
1 janvier 1980 - 1 juillet 1981	51,184s
1 juillet 1981 - 1 juillet 1982	52,184s
1 juillet 1982 - 1 juillet 1983	53,184s
1 juillet 1983 - 1 juillet 1985	54,184s
1 juillet 1985 - 1 juillet 1988	55,184s
1 juillet 1988 - 1 janvier 1990	56,184s
1 janvier 1990 - 1 janvier 1991	57,184s
1 janvier 1991 - 1 juillet 1992	58,184s
1 juillet 1992 - 1 juillet 1993	59,184s
1 juillet 1993 - 1 juillet 1994	60,184s
1 juillet 1994 - 1 janvier 1996	61,184s
1 janvier 1996 - 1 juillet 1997	62,184s
1 juillet 1997 - 1 janvier 1999	63,184s
1 janvier 1999 - 1 janvier 2006	64,184s
1 janvier 2006 - 1 janvier 2009	65,184s
1 janvier 2009 - 1 juillet 2012	66,184s
1 juillet 2012 -	67,184s



*Différence entre le Temps Terrestre TT et UT1 et UTC*

La figure suivante donne une extrapolation dans le passé de cette différence car déjà la Terre ralentissait, même si on l'ignorait. Cette extrapolation est déterminée à partir de diverses observations telles les éclipses de Soleil et est nécessaire pour l'analyse des observations anciennes : il ne faut pas attribuer une accélération à certains corps du système solaire, accélération qui n'est que la signature du ralentissement de la rotation de la Terre. Les éclipses de Soleil anciennes ont montré que la valeur TT-UT atteignait 3 heures il y a deux mille ans.



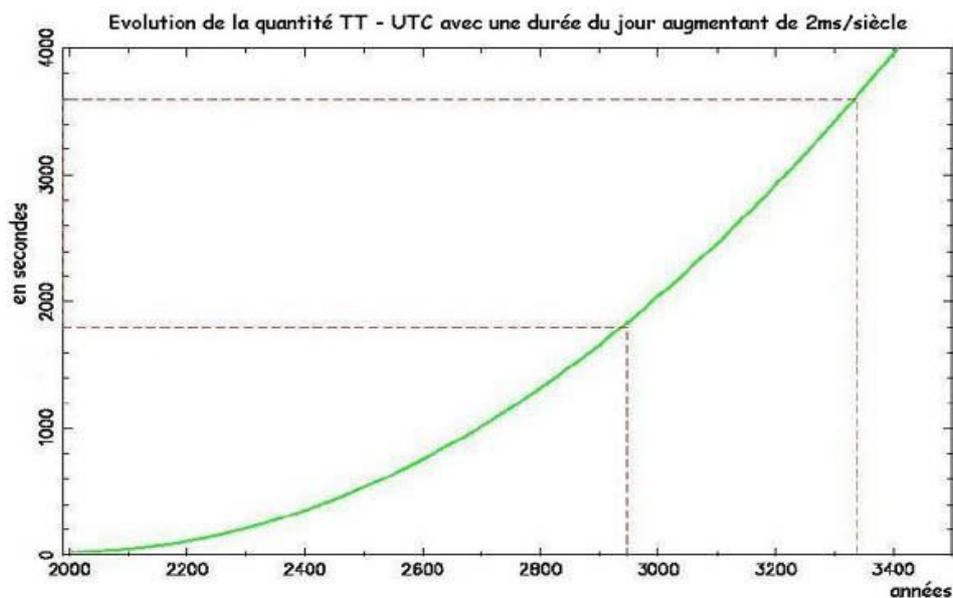
*Différence entre le Temps Terrestre TT (ou Temps des Ephémérides) et le Temps Universel UT (ou UTC) Crédit: Stephenson et Morrison*

La figure suivante donne la durée du jour en fonction du temps: en effet, le ralentissement de la rotation de la Terre autour de son axe a pour effet d'allonger la durée du jour. Cette augmentation (minime, de l'ordre de 2 millisecondes par siècle) a cependant un effet cumulatif non négligeable comme on l'a vu ci-dessus. On peut remarquer que ce ralentissement est très irrégulier. Au ralentissement séculaire s'ajoutent des variations dues au couplage entre le noyau et le manteau de la Terre dites "variations décennales".



*Variation de la durée du jour*

Une discussion internationale est actuellement en cours afin de décider éventuellement d'arrêter le système des secondes intercalaires. Ainsi, le temps lié à la rotation de la Terre se séparerait du temps uniforme construit avec les horloges atomiques. La figure ci-dessous montre la croissance de l'écart TT-UTC dans l'avenir. Cet écart serait celui qui nous séparerait petit à petit de l'heure solaire si on renonçait aux secondes intercalaires. Il faudrait ajouter une "heure intercalaire" vers l'an 3330.

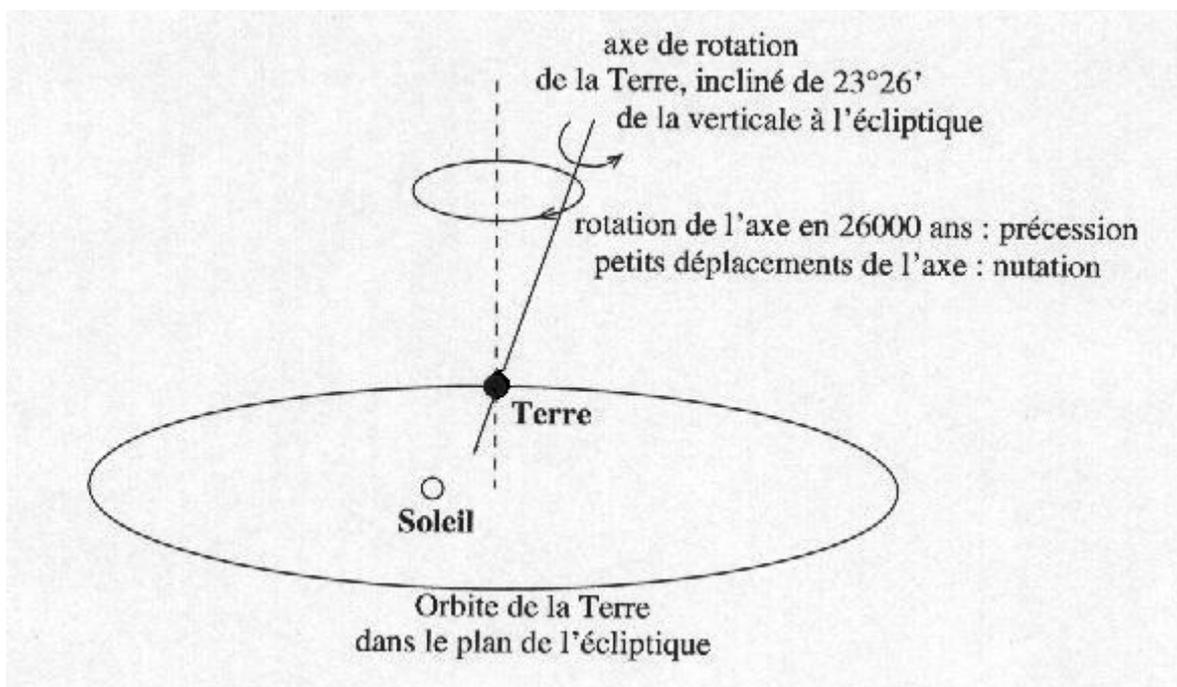


*Croissance de TT-UTC dans l'avenir*

Enfin, ajoutons que le Temps sidéral n'est pas une échelle de temps : c'est un angle (angle horaire du point vernal) qui donne la position de la Terre autour de son axe. Il sert à trouver un astre dans le ciel local à partir de ses coordonnées sphériques ascension droite et déclinaison.

#### 4) Précession et nutation

Le ralentissement de la rotation terrestre nous a montré le caractère irrégulier de cette rotation. De plus, l'axe de rotation ne reste pas fixe au cours du temps : les perturbations gravitationnelles de la Lune, du Soleil et des planètes entraînent différents mouvements de cet axe. D'abord un mouvement oscillant "périodique" rapide de petites amplitudes autour d'une position moyenne, c'est la nutation. Ensuite, un mouvement lent, "séculaire" : tout en restant incliné à peu près de  $23^{\circ} 26'$  sur l'écliptique (le plan orbital de la Terre), l'axe va effectuer une rotation complète en 25 700 ans. C'est la précession : dans un peu moins de 13 000 ans, l'étoile polaire aura changée. C'est vers l'étoile Véga que pointerait l'axe de rotation de la Terre et 13 000 ans plus tard il sera à nouveau dirigé vers notre étoile polaire.



*Le principe de la précession et de la nutation dues au changement de direction de l'axe de rotation de la Terre*

Ce mouvement de précession implique bien sûr que l'équinoxe ou point vernal va effectuer une rotation sur notre sphère céleste en 25 700 ans, c'est-à-dire que l'origine des ascensions droites que nous avons choisie sur notre sphère céleste est mobile! Il ne sera guère pratique ainsi de mesurer les mouvements des étoiles sur notre sphère céleste... Le problème est résolu par le choix d'un équinoxe à une date donnée. Ainsi, aujourd'hui, le point vernal origine est celui du début de l'année 2000 : tous les catalogues d'étoiles utilisent cette référence et l'utiliseront encore pendant des années. Il est à noter que les observations sur le ciel peuvent, dans certains cas, se faire par rapport au point vernal du jour de l'observation et qu'une correction sera faite pour se ramener à un repère commun, celui de 2000.

Les positions dans un repère de la date sont dites coordonnées "vraies de la date" et celle dans un repère 2000 sont dites "moyennes J2000". Dans le premier cas, on utilise un axe affecté de

la nutation et de la précession et dans le deuxième cas, on élimine la nutation (coordonnées moyennes) en prenant l'axe "moyen" du début de l'année 2000.

## 5) Définition de l'année

L'année semble être facile à définir : c'est la durée nécessaire à la Terre pour faire un tour complet autour du Soleil. En fait ce n'est pas si simple. L'année intervient dans notre calendrier et le fait que la Terre ait accompli un tour complet ( $360^\circ$ ) n'est pas un critère fondamental.

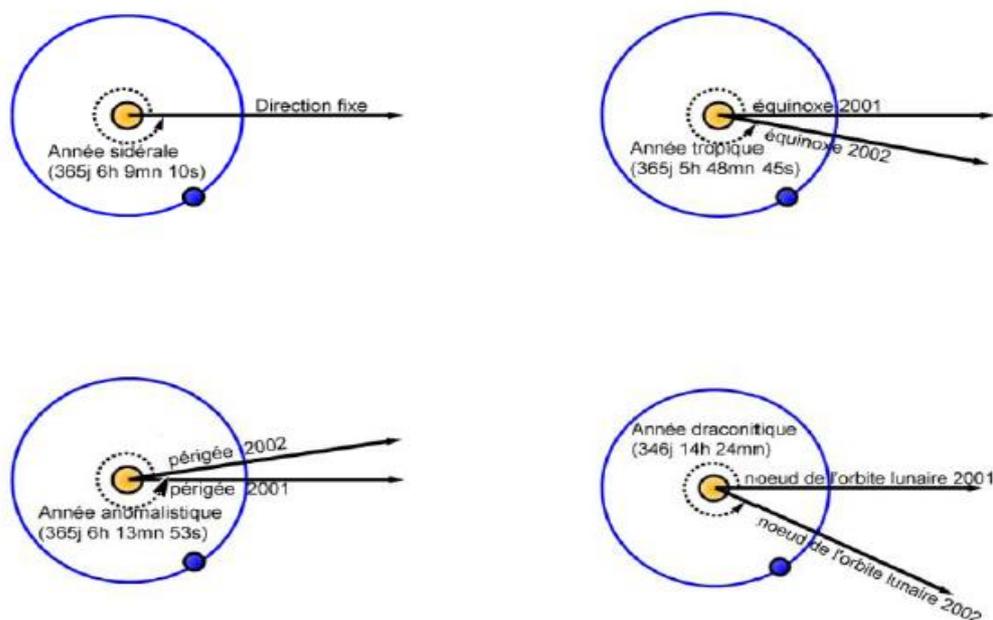
Si on prend une direction fixe dans l'espace, la Terre mettra 365 jours 6 h 9 mn 10 s pour revenir dans cette même direction. On appelle cette durée l'année sidérale.

Si on considère la direction du point vernal de la date (équinoxe de printemps), la Terre mettra 365 jours 5h 48m 45s pour revenir dans la direction de ce point. C'est une durée différente de l'année sidérale puisque le point vernal a bougé pendant que la Terre tournait... On appelle cette durée l'année tropique.

Si on considère le point de l'orbite de la Terre le plus près du Soleil (le périhélie, actuellement le 3 janvier), la Terre mettra 365 jours 6h 13m 53s pour y revenir. On appelle cette durée l'année anomalistique.

Si on considère la direction du noeud de l'orbite lunaire, la Terre mettra 346 jours 14h 24m pour y revenir. On appelle cette durée l'année draconitique.

On voit que l'on a le choix pour définir une année. Ce choix sera dicté par des considérations sociales, culturelles et religieuses. Notre calendrier (grégorien) a adopté l'année tropique parce qu'elle fait revenir les saisons à la même date chaque année (calendrier solaire). Le calendrier chinois utilise l'année sidérale parce qu'il se cale sur le mouvement des astres dans le zodiaque (par rapport aux étoiles fixes). L'année draconitique ne sert que pour déterminer la périodicité des éclipses de Soleil. Les calendriers lunaires (comme le calendrier musulman) privilégient une bonne approximation des mois sur les lunaisons. Ils sont indépendants du mouvement de la Terre autour du Soleil.



## II- Le Temps... des astronomes aux physiciens

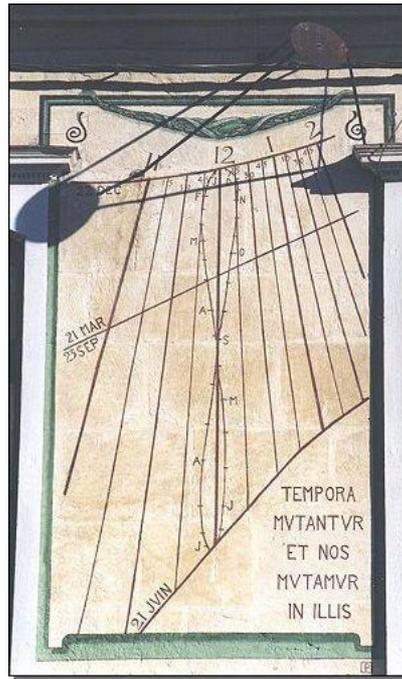
Dès l'aube de l'humanité l'homme a cherché à mesurer le temps pour prévoir le retour des saisons froides ou chaudes afin, par exemple, d'assurer sa subsistance. C'est l'alternance des jours et des nuits, donc le mouvement apparent du Soleil dans le ciel, qui va, entre autre, s'imposer à lui. Ce sont donc des considérations pratiques qui ont guidé les premières recherches sur le temps. Mais le concept de temps est aussi une question scientifique et philosophique de la plus haute importance. Cette quête fondamentale de connaissances conduit aujourd'hui les scientifiques à des recherches en physique de très haut niveau. Historiquement on peut dire que la mesure du temps est d'abord et essentiellement de nature astronomique. Elle ne deviendra l'affaire des physiciens que beaucoup plus tard, dans le courant du vingtième siècle.

### 1)- Le temps en astronomie

Tous les phénomènes périodiques peuvent être utilisés pour définir une échelle de temps. Une idée vient donc naturellement en regardant le ciel : utiliser l'alternance des jours et des nuits, donc le mouvement du Soleil, comme phénomène de base pour construire une échelle de temps. L'utilisation du mouvement du Soleil est le principe de base de fonctionnement des cadrans solaires. Un des premiers cadrans qui nous soit parvenu est un cadran solaire égyptien qui date d'environ 1500 ans avant Jésus-Christ mais l'art des cadrans solaires, la gnomonique, ne connaîtra son apogée que vers les XVIème et XVIIème siècles.

#### *1-1 Temps solaire et seconde de temps moyen*

Le temps donné par les cadrans solaires est ce que l'on appelle en astronomie le temps solaire vrai d'un lieu. Ce temps est donc un temps local qui n'est pas uniforme à cause de la non uniformité du mouvement du Soleil dans le ciel. Cela tient au fait que le Soleil vrai se déplace sur une orbite elliptique suivant les lois de Kepler, dans le plan de l'écliptique. Ce temps fût d'un usage très courant jusqu'au XVIIIème siècle. Le développement rapide des moyens de communication rendit cependant obligatoire l'adoption d'un temps solaire moyen. Ce temps solaire moyen est donné par un soleil moyen (fictif) se déplaçant sur une orbite circulaire, à vitesse constante, dans le plan de l'équateur céleste. Ce temps solaire moyen est à l'origine de la première définition astronomique de la seconde jusqu'en 1960 : c'était la *86400ème partie du jour solaire moyen*. La différence entre temps solaire moyen et temps solaire vrai s'appelle *l'équation du temps* (voir I ci-dessus).



*Le cadran solaire indique le temps solaire vrai*

Les variations du temps solaire vrai par rapport au temps solaire moyen sont de nature essentiellement géométrique. Newton est probablement le premier à avoir pensé à la non uniformité du mouvement de la Terre puisqu'il mentionne explicitement dans son livre des Principes (1686) que les astronomes doivent corriger le temps vrai fourni par l'observation du Soleil de l'équation du temps. Il ajoute également : "il se peut qu'il n'existe aucun mouvement uniforme par lequel le temps puisse être mesuré avec précision". Kant en 1754 puis Lalande en 1771 émettront des doutes quant à l'uniformité du mouvement de rotation de la Terre, et par voie de conséquence de celui du Soleil dans le ciel. On sait aujourd'hui que la rotation de la Terre n'est pas uniforme : le frottement des marées océaniques sur l'écorce terrestre, les variations saisonnières d'origine météorologique sont des causes maintenant bien connues de non uniformité de la rotation terrestre.

### *1-2 Temps des éphémérides et seconde des éphémérides*

Tout cela a conduit les astronomes à construire une autre échelle de temps fondée sur le mouvement orbital (révolution) de la Terre autour du Soleil. Cette nouvelle échelle de temps légalement en usage entre 1960 et 1967 s'appelle le Temps des éphémérides. Elle est fondée sur l'observation de la longitude du Soleil dans le ciel au cours de l'année. L'équation qui définit numériquement la longitude du Soleil a été donnée par Newcomb et a été adoptée officiellement en 1952 par l'Union astronomique internationale. C'est un polynôme du second degré du temps. Si donc on observe la longitude du Soleil on en déduit aisément l'instant correspondant dans l'échelle de temps des éphémérides. En 1960 la onzième conférence générale des poids et mesures décida que *la seconde est la fraction 1/31556925.9747 de l'année tropique pour le 0 janvier 1900 à 12 heures de temps des éphémérides*. La définition du Temps des éphémérides est difficile à réaliser en pratique. Elle est également difficile à comprendre par des non astronomes : l'accessibilité et l'universalité qui sont des propriétés attendues des échelles de temps ne sont donc pas respectées. Cela a conduit à l'abandon de cette échelle de temps au profit de l'échelle de temps atomique qui est à l'heure actuelle notre meilleure référence.

## 2)- Le temps en physique

C'est en 1955 que le premier étalon de fréquence fut construit par L. Essen et J. Parry qui travaillaient au National Physical Laboratory de Londres. Ces premiers travaux ouvrirent la voie à une nouvelle définition de la seconde qui vit le jour en 1967 lors de la treizième conférence générale des poids et mesures. *La seconde est la durée de 9192631770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins  $F=3$  et  $F=4$  de l'état fondamental  $6S_{1/2}$  de l'atome de césium 133.* Malgré une complexité apparente au moins aussi grande que celle de la définition de la seconde de temps des éphémérides, cette définition offre l'avantage d'une bien meilleure accessibilité.

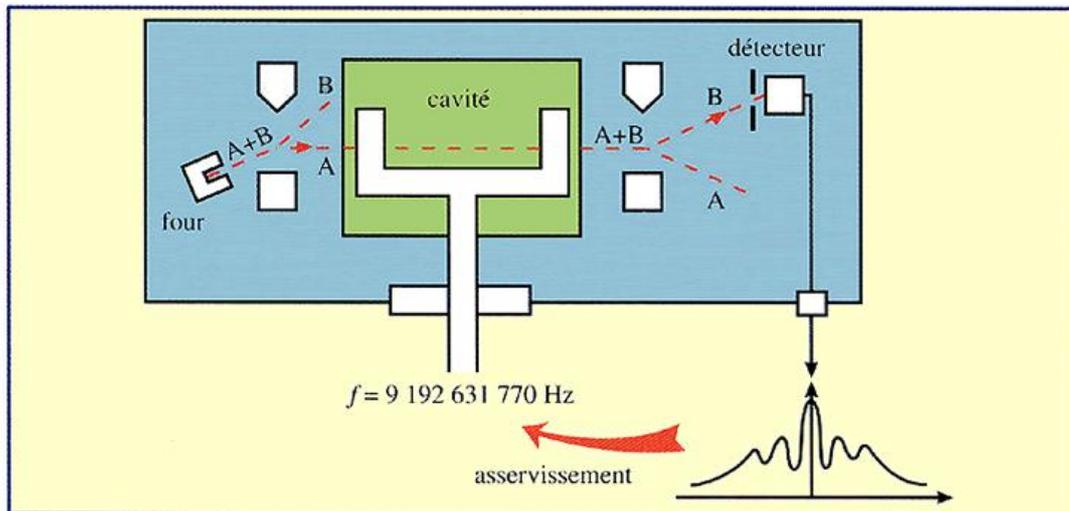
### *2-1 Principe d'un étalon primaire de fréquence, seconde de temps atomique*

La mécanique quantique nous apprend que les atomes peuvent se trouver dans différents états ou niveaux d'énergie qui sont quantifiés. Autrement dit les valeurs de l'énergie des atomes prennent des valeurs discrètes et non continues. Le niveau d'énergie la plus basse sera appelé le niveau fondamental. Le niveau fondamental se décompose lui même en deux niveaux hyperfins notés respectivement  $F=3$  et  $F=4$ . On sait également, depuis Max Planck, que pour faire passer un atome d'un niveau d'énergie à un autre, il faut lui apporter une énergie, sous forme de rayonnement électromagnétique, correspondant à la différence d'énergie des deux niveaux considérés. Des mesures réalisées entre 1955 et 1958 ont montré que l'atome de césium 133 pouvait passer du niveau hyperfin noté  $F=3$  au niveau hyperfin noté  $F=4$  lorsqu'il était soumis à un rayonnement micro-onde de fréquence 9192631770 Hz. C'est cette valeur qui est à la base de la définition de la seconde atomique. Un appareil électronique, un compteur de cycle, va donc compter 9192631770 cycles pendant une durée d'une seconde. L'appareil qui réalise ainsi la définition de la seconde atomique s'appelle un étalon primaire de fréquence. Il en existe actuellement différents types : les étalons primaires de fréquence à déflexion magnétique, à pompage optique et les fontaines atomiques. L'appareil qui compte les secondes et qui les accumule au cours du temps est une horloge atomique.

### *2-2 Etalons à déflexion magnétique*

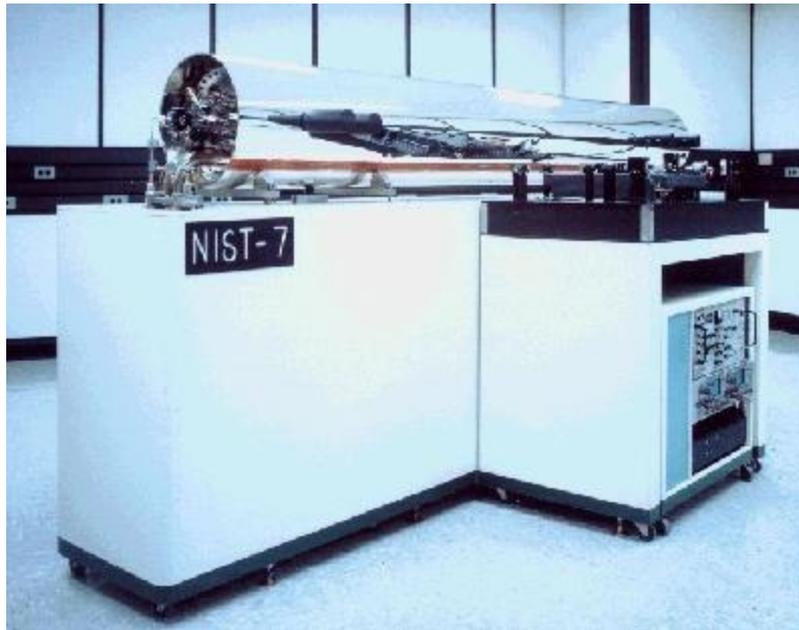
Le césium est un métal alcalin dont la température de fusion est de l'ordre de  $27^{\circ}\text{C}$ . Ce césium est enfermé dans un four et porté à une température de l'ordre de  $100^{\circ}\text{C}$ . Les vapeurs de césium sortent du four et sont collimatées par des diaphragmes de façon à obtenir un jet de césium homocinétique. Le césium passe alors dans l'entrefer d'un aimant dont le champ est rendu inhomogène. Les atomes de césium, qui sont naturellement dans les deux niveaux hyperfins  $F=3$  et  $F=4$ , vont alors être déviés de façon différente par le champ magnétique. Cette déflexion différente est due au fait que les atomes possèdent des moments magnétiques différents suivant qu'ils sont dans les états  $F=3$  ou  $F=4$ . Supposons que seuls les atomes qui sont dans l'état  $F=3$  soient utilisés c'est-à-dire qu'ils rentrent seuls dans la cavité micro-onde de l'étalon (cavité de Ramsey). Si la fréquence envoyée aux atomes est exactement égale à 9192631770 Hz tous les atomes vont passer du niveau  $F=3$  au niveau  $F=4$ . En réalité la fréquence envoyée dans la cavité n'est jamais exactement égale à la fréquence de définition. Cela se traduit par le fait qu'une plus ou moins grande quantité d'atomes va subir la transition atomique. Le nombre d'atomes dans l'état  $F=4$  sera d'autant plus grand que la fréquence sera proche de la fréquence de définition. Il faut donc mesurer la proportion d'atomes dans l'état  $F=4$ . Cette mesure est réalisée grâce à un aimant sélecteur à champ inhomogène qui va trier les atomes puisque ces derniers ont des moments magnétiques différents. Les atomes dans l'état  $F=3$  sont déviés hors de l'étalon et les atomes dans l'état  $F=4$  sont ionisés afin de créer un courant qui sera aisément détectable. Plus l'intensité de ce courant sera forte, plus le nombre d'atomes dans l'état  $F=4$  sera grand et plus la fréquence envoyée dans la cavité sera proche de la fréquence recherchée. Un dispositif d'asservissement de la fréquence permet de modifier cette dernière, en temps réel, en fonction

de la valeur du courant mesuré. Grâce à ce dispositif la fréquence délivrée par l'étalon est donc toujours calée sur la fréquence de résonance. Des étalons primaires de fréquence à déflexion magnétique, PTB-CSIII et PTB-CsIV, se trouvent à la Physikalisch-Technische Bundesanstalt en Allemagne.



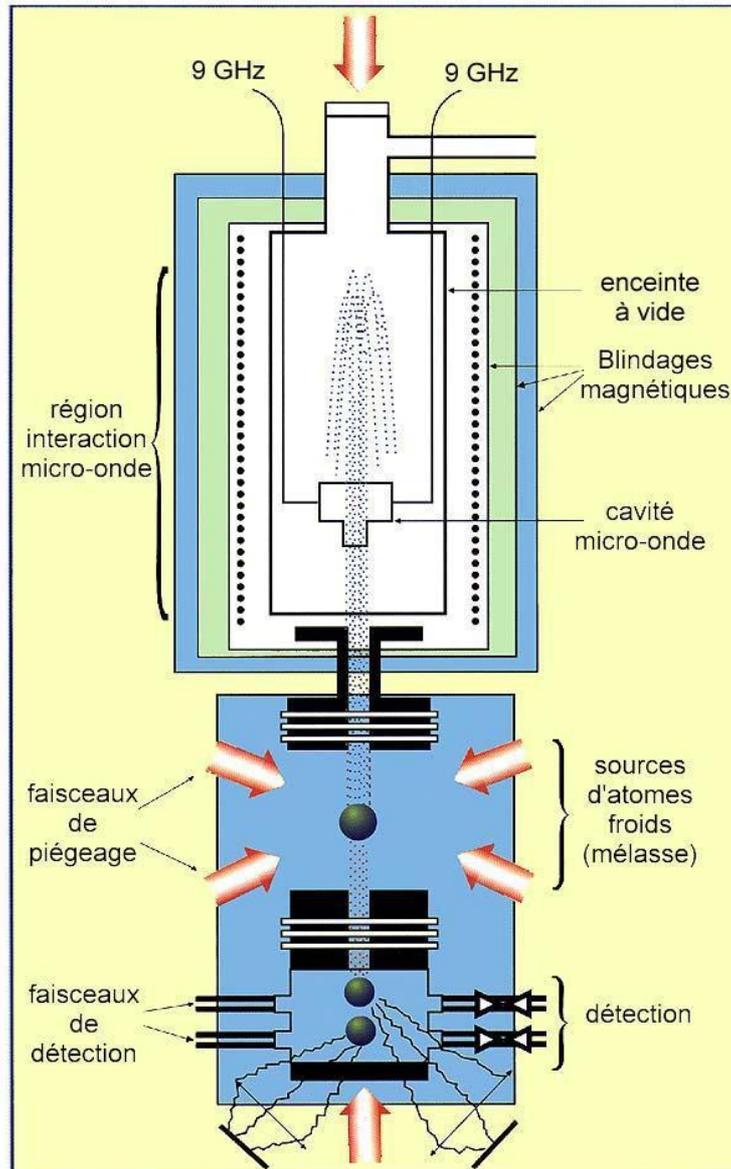
### 2-3 Etalons à pompage optique

Les étalons à pompage optique sont un autre type d'étalons primaires qui ressemblent beaucoup au précédent. La différence essentielle réside dans le fait que les aimants sont remplacés par des lasers qui doivent créer une "inversion de population". Dans le principe l'idée est d'apporter l'énergie nécessaire à l'atome de césium, sous forme d'énergie lumineuse, pour qu'il passe de l'état  $F=3$  à l'état  $F=4$ . La fréquence du laser utilisé est bien sûr telle que l'énergie correspondante, calculée grâce à la loi de Planck, soit égale à l'énergie qu'il faut à l'atome pour changer d'état. En réalité l'atome de césium ne passe pas directement de l'état  $F=3$  à l'état  $F=4$ . Les atomes qui se trouvent dans l'état  $F=4$  vont être excités par le laser de façon à ce qu'ils passent dans un niveau d'énergie supérieure. Une propriété essentielle de ce niveau est que sa durée de vie est très courte, autrement dit les atomes vont revenir très vite soit dans l'état  $F=3$  soit dans l'état  $F=4$ . La population initiale de l'état  $F=4$  se retrouve alors pour moitié dans l'état  $F=3$  et pour moitié dans l'état  $F=4$ . C'est alors la reprise du mécanisme précédent jusqu'à ce que le niveau  $F=4$  soit complètement dépeuplé au profit du niveau  $F=3$ . Les atomes peuvent alors entrer dans la cavité micro-onde comme dans le cas de l'étalon à déflexion. De même que pour l'inversion de population, la détection des atomes ayant subi la transition atomique dans la cavité se fait à l'aide d'un laser. Ces atomes sont maintenant, en grande majorité si la fréquence micro-onde possède la bonne valeur, dans l'état  $F=4$ . En passant dans le faisceau du second laser ils vont être excités dans le niveau d'énergie supérieure. Lorsqu'ils vont retomber vers le niveau fondamental,  $F=3$  ou  $F=4$ , ils vont restituer de l'énergie sous une forme lumineuse dite de fluorescence. Il s'agit donc de détecter cette lumière de fluorescence et de rendre son intensité maximum en jouant sur la fréquence micro-onde afin que cette dernière soit la plus proche possible de la fréquence de définition de la seconde. Plusieurs étalons à pompage optique sont actuellement en fonctionnement dans le monde : JPO au Laboratoire primaire du temps et des fréquences, laboratoire du Bureau national de métrologie à l'observatoire de Paris, NIST7 au National Institute of Standards and Technology (USA).



#### *2-4 Fontaines atomiques*

Les fontaines atomiques sont les derniers développements de la technique des étalons de fréquence. Ils utilisent la technique du refroidissement des atomes qui a valu son prix Nobel à C. Cohen- Tannoudji en 1997. En effet, et quel que soit l'étalon considéré, le nombre d'atomes qui subit l'interaction micro-onde est d'autant mieux déterminé que la durée d'interaction de ces derniers dans la cavité est plus importante. Afin d'augmenter ce temps d'interaction les atomes sont piégés, confinés, dans six faisceaux lasers concourants afin de réduire le plus possible leur vitesse d'agitation thermique. La physique statistique nous enseigne en effet que la température d'un gaz est proportionnelle à la vitesse d'agitation des particules qui le compose. Si la vitesse est très faible la température correspondante sera très basse d'où le nom de la technique utilisée. Une fois les atomes confinés, ils vont être lancés en direction de la cavité micro-onde, comme dans les étalons classiques, à la seule différence que la cavité est cette fois verticale. La verticalité de la cavité s'impose à cause de la faible vitesse des atomes qui, s'ils effectuaient un vol balistique horizontal, "tomberaient vers le bas". Pour des raisons techniques (homogénéité du champ magnétique...) la cavité micro-onde n'est pas réalisée en un seul morceau de longueur  $D$  à l'intérieur duquel aurait lieu, de façon continue, l'interaction. Dans le cas des étalons à déflexion ou à pompage une cavité dite de Ramsey est utilisée dans laquelle l'interaction a lieu en chacune de ses extrémités qui sont séparées par une distance  $D$ . Dans le cas de la fontaine atomique la cavité est encore un peu différente : il n'y a qu'une seule zone dans laquelle l'interaction micro-onde a lieu, mais deux fois de suite, une fois lorsque les atomes vont vers le haut et une fois lorsqu'ils vont vers le bas. La préparation et la détection des atomes de césium se font comme dans le cas d'un étalon à pompage optique classique. La meilleure fontaine atomique actuellement en fonctionnement dans le monde, FO1, se trouve au Laboratoire primaire du temps et des fréquences, laboratoire du Bureau national de métrologie à l'observatoire de Paris.



## 2-5 Calcul du Temps atomique international TAI

Les horloges atomiques à césium sont des étalons primaires de fréquence très particuliers. Ils génèrent la seconde du système international comme dans le cas d'un étalon classique mais les accumulent également de façon à produire des minutes et des heures. La finalité de ces instruments est différente de celle des étalons. Alors que ces derniers doivent avoir une très bonne *exactitude*, une différence la plus faible possible entre la définition de la seconde du SI et la seconde réalisée par l'instrument, les horloges doivent avoir une excellente *stabilité* à long terme c'est à dire que les variations de la seconde produite doivent être les plus faibles possibles autour d'une valeur moyenne (qui n'est pas forcément très proche de la seconde du SI). Les principales horloges atomiques commerciales à césium sont du premier type étudié : ce sont des instruments à déflexion magnétique. D'autres horloges atomiques existent qui n'utilisent pas l'atome de césium. Il existe des horloges à rubidium, des horloges à quartz, des masers à hydrogène... C'est ce dernier type d'horloge, avec les horloges à césium, qui est le plus utilisé dans le calcul du temps atomique international. La 14<sup>ème</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a décidé que *le Temps atomique international est la coordonnée de*

*repérage temporel établie sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde, unité de temps du Système international d'unités.* C'est actuellement le Bureau international des poids et mesures qui est en charge du calcul du TAI. Cet organisme collecte les données d'environ 230 horloges (en 2000) réparties dans 65 laboratoires (en 2000). Le calcul du TAI est effectué à l'aide d'un algorithme, ALGOS, qui effectue une moyenne pondérée des lectures des horloges, la finalité étant d'obtenir une très bonne stabilité à long terme. L'exactitude de l'échelle de temps est assurée par des comparaisons régulières entre son intervalle unitaire et l'intervalle unitaire obtenu par les différents étalons primaires de fréquence répartis dans le monde. Ce mode de calcul permet d'obtenir une autre des propriétés attendues des échelles de temps : la pérennité. Une horloge qui cesse de fonctionner peut très facilement être remplacée par une autre sans que le comportement global du TAI en soit affecté. Actuellement l'instabilité du TAI est estimée à environ  $4.10^{-15}$  à 10 jours,  $4,3.10^{-15}$  à 40 jours,  $4,5.10^{-15}$  à 160 jours et  $10^{-14}$  au delà de 3 ans. Ces estimations sont effectuées à l'aide d'un estimateur statistique dénommé variance de Allan.

### *2-6 Comparaison d'horloges à distance*

Il existe de nombreux organismes dans le monde qui possèdent des horloges atomiques ou des étalons primaires de fréquence. Bien sûr chacun de ces organismes souhaite comparer ses propres instruments à ceux des autres, à des fins d'évaluation et d'amélioration de leurs qualités métrologiques, ou simplement pour participer au calcul du temps atomique international, TAI. La méthode la plus classique pour comparer des horloges distantes consiste à employer les satellites du Global Positioning System, GPS. Le GPS est un système militaire de radio-navigation constitué d'un ensemble de satellites en orbite à 20000 km autour de la Terre. Chaque station équipée d'une des horloges à comparer reçoit les signaux d'un satellite du GPS. Les temps d'arrivée des signaux sont datés grâce à l'horloge de la station réceptrice alors que les temps d'émission de ces signaux par un satellite quelconque sont datés dans l'échelle de temps de l'horloge embarquée par ce satellite. Un algorithme permet de faire la correspondance entre l'échelle de temps du satellite et le temps du GPS. En faisant une simple différence des observations effectuées aux mêmes instants dans les deux stations le temps du GPS disparaît et il est ainsi possible d'obtenir la différence de lecture des horloges des deux stations.

### **3)- Applications de la métrologie du temps**

Toutes les études entreprises en métrologie du temps ont bien sûr des applications. Dans le domaine de la recherche fondamentale on peut citer les tentatives de raccordement des unités du SI à la définition de la seconde car c'est l'unité qu'on sait, de loin, le mieux réaliser (incertitude relative de l'ordre de  $10^{-15}$ ). Certaines constantes de la physique peuvent être déterminées par la seule mesure de la fréquence de phénomènes physiques, on peut alors obtenir leur valeur avec une très faible incertitude : la constante de Rydberg, le facteur de Landé de l'électron et la constante de structure fine en sont quelques exemples. La métrologie du temps a également un impact sur la physique atomique par le biais de la vérification de la linéarité de la mécanique quantique (équation de Schrödinger) et par sa contribution à la connaissance de certaines propriétés atomiques et moléculaires. La mesure du temps intervient également dans les tests des modèles de structure de l'espace-temps et de la gravitation par l'utilisation directe ou indirecte des étalons atomiques de temps. La finalité de ces tests est la discrimination des différentes théories de la gravitation, la relativité générale d'Einstein n'étant qu'une théorie parmi d'autres. La métrologie du temps trouve aussi sa place dans bon nombre d'applications de positionnement, de géodésie ou de navigation : le système

GPS en est un exemple, le GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS) ainsi que les systèmes DORIS (Détermination d'orbite et radio-positionnement intégrés par satellites) et PRARE (Precise Range Rate Equipment) en sont d'autres. La technique de radio-interférométrie à très longue base dite VLBI (Very Long Baseline Interferometry) trouve des applications dans l'étude de la rotation de la Terre et dans la formation des systèmes de référence céleste et terrestre. Les mesures VLBI font appel à la stabilité de fréquence des masers à hydrogène présents dans les stations d'observation : c'est le domaine de la métrologie du temps. Les pulsars millisecondes sont des objets dont l'observation a démontré que leur stabilité de fréquence pouvait peut-être rivaliser avec la stabilité des meilleures échelles de temps atomique (TAI, TT(BIPM),...). Des études de très longue haleine sont en cours pour connaître la réponse à cette question. La métrologie du temps est doublement présente dans ces recherches. Premièrement parce que les temps d'arrivée des impulsions radio émises par ces astres sont datés par rapport à une horloge atomique présente dans la station d'observation. Deuxièmement parce qu'il faut raccorder cette horloge aux meilleures échelles de temps atomique à des fins de comparaison.

#### 4)- Bibliographie

Calendriers et chronologie J. P. Parisot, F. Suagher Ed. Masson

Les fondements de la mesure du temps. Comment les fréquences atomiques règlent le monde C. Audoin, B. Guinot Ed. Masson

Gnomonique moderne D. Savoie Ed. Société astronomique de France

Introduction aux éphémérides astronomiques. Supplément explicatif à la connaissance des temps J. L. Simon, M. Chapront-Touzé, B. Morando, W. Thuillot EDP Sciences

Echelles de temps atomiques M. Granveaud Ed. Chiron

### III- L'heure légale

L'heure nous permet de mesurer l'écoulement du temps au cours de la journée. Elle mesure une durée depuis le début du jour contrairement aux numéros des jours, des mois, des années, des siècles, des millénaires, qui indiquent un numéro d'ordre dans une chronologie.

La seule heure naturelle que nous pouvons percevoir est l'heure donnée par le Soleil liée à l'alternance jour-nuit : le Soleil nous indique le midi (c'est le moment où il est au plus haut dans le ciel) d'où nous déduisons le "minuit". Par convention, nous décomptons 24 heures au cours d'une journée de midi à midi ou de minuit à minuit. Pendant des siècles, l'heure du Soleil fut la seule accessible grâce aux cadrans solaires. On définit ainsi le **temps solaire vrai** en un lieu comme l'angle horaire du Soleil en ce lieu pour un instant donné. C'est une notion hybride qui traduit à la fois le mouvement de la Terre autour de son axe et son mouvement de révolution autour du Soleil.

L'heure solaire présente cependant plusieurs inconvénients : tout d'abord elle est locale, c'est-à-dire qu'elle dépend du lieu où on se trouve. Ensuite, elle n'est pas uniforme du fait de l'excentricité de l'orbite terrestre (voir les pages sur les échelles de temps). Ce dernier inconvénient a été résolu en utilisant un **temps moyen** résultant d'une moyenne sur une année dont on connaît l'écart au temps solaire vrai par l'équation du temps. Il reste encore le

problème d'une heure qui dépend du lieu où on se trouve. Ce problème a été résolu au XIX<sup>ème</sup> siècle sous l'impulsion des compagnies de chemins de fer. On a trouvé préférable d'utiliser la même heure partout, l'heure de Paris définie par le **temps civil** de Paris, défini lui, comme étant le temps moyen de Paris augmenté de 12 heures. Cette stipulation vient du fait que le temps moyen fait commencer le jour à midi (c'est le seul instant observable), ce qui n'est pas pratique dans la vie de tous les jours...

Cette méthode de temps unique pour un pays réglé sur le temps moyen de l'une des villes pose à nouveau le problème de coordonner une heure dans le monde entier. Mais s'il est possible d'imposer l'heure de Paris dans toute la France (l'écart au temps solaire vrai ne dépasse pas 30 minutes environ), il sera plus difficile de l'imposer au reste du monde du fait du décalage au temps solaire vrai qui ira grandissant en s'éloignant du lieu de référence. Cela a amené les états à se mettre d'accord pour définir un **temps universel**, référence pour tous, et des temps locaux qui ne différeraient que d'un nombre entier d'heures, par la création de "fuseaux horaires".

Le temps universel est donc une échelle de temps universelle, comme son nom l'indique. Par convention internationale, le temps universel est le temps moyen de Greenwich, augmenté de 12 heures .

## 1)- L'heure en France

Selon la loi du 9 mars 1911 en vigueur jusqu'en 1978, l'heure légale en France était l'heure du temps moyen de Paris retardée de 9 minutes 21 secondes. Cette définition voulait signifier en fait que l'heure légale en France était le temps universel (mais l'heure en usage pouvait différer de l'heure légale comme en témoignent les heures d'hiver et d'été qui ont été utilisées pendant certaines périodes) . La loi de 1911 a été remplacée par le décret du 9 août 1978 qui stipule que "le temps légal est obtenu en ajoutant ou en retranchant un nombre entier d'heures au temps universel coordonné" (voir les pages sur les échelles de temps). Un décret fixe ce nombre pour chaque partie du territoire de la République Française en fonction des fuseaux horaires. Il peut l'accroître ou le diminuer pendant une partie de l'année. Ce nouveau décret prévoit donc l'usage d'une heure d'été, apparue pour la première fois en 1916. C'est cette heure qui est diffusée par l'horloge parlante que l'on peut appeler par téléphone au 36 99.

## 2)- Les fuseaux horaires

Chaque pays va définir son heure par l'écart au temps universel. Cet écart étant déterminé de façon à ce que l'heure adoptée respecte le cycle journalier lié au lever du Soleil, au midi , et au coucher du Soleil. Cependant, pour faciliter les changements d'heure pour les voyageurs, les accords internationaux prévoient d'adopter un écart au temps universel égal à un nombre entier d'heures. Pour cela, on définit 24 zones autour du globe appelées "fuseaux horaires".

Chaque pays se rattache ainsi au fuseau le mieux adapté et définit son heure légale ou standard comme TU (temps universel) + ou - N heures (où N est un nombre entier). Cela ne l'empêche pas d'ajouter ou de retrancher une heure pour définir une heure d'été ou autre. Les pays très étendus en longitude adoptent plusieurs heures légales (par exemple aux USA, il y a 7 heures légales : Atlantique, Est, Central, Montagne, Ouest, Alaska et Hawaï, avec deux variantes : l'heure standard applicable en hiver et l'heure "de la lumière du jour" qui correspond à notre heure d'été puisqu'on l'applique en été en ajoutant une heure à l'heure standard).

L'existence de fuseaux horaires va entraîner l'existence d'une "ligne de changement de date". Examinons en effet l'écart des heures locales au temps universel. En allant vers l'Est, le Soleil

va se lever plus tôt et donc, pour obtenir les heures locales on va ajouter une heure, puis deux, puis trois au temps universel en se déplaçant vers l'Est. En allant vers l'Ouest ce sera le contraire : on retirera des heures au temps universel pour que midi reste à 12 heures... En effet, s'il est midi en France, les pays situés à l'Est de la France sur une même latitude verront le Soleil vers la France, c'est-à-dire vers l'Ouest, c'est donc que ce sera l'après-midi et qu'il sera plus tard qu'en France et qu'on ajoutera une ou plusieurs heures à l'heure française pour obtenir l'heure locale.

Donc en allant vers l'Est on ajoute des heures : on arrive à la ligne de changement de date quand on a ajouté douze heures. S'il est midi en temps universel, il sera minuit le soir du même jour sur le dernier fuseau vers l'Est que l'on notera FE. En allant vers l'Ouest, on retranchera des heures et il sera 0 heure du même jour en arrivant sur le dernier fuseau vers l'ouest que l'on notera FO. Les deux fuseaux concernés sont en fait côte à côte et une heure plus tard, il sera 1 heure du même jour sur le fuseau FO et une heure du lendemain sur le fuseau FE qui vient de passer minuit. Le passage de la ligne de changement de date fait donc effectivement passer d'un jour à l'autre à une même heure ou plutôt à un même moment de la journée. Notons cependant que tout le monde est à la même heure et à la même date en temps universel, ce qui permet de s'y retrouver.

On trouvera ci-dessous la répartition des heures légales selon les fuseaux horaires sur tous les continents. Remarquons que certains territoires comme le Groenland ou l'Antarctique n'ont pas d'heure légale propre: le Temps Universel y est donc utilisé. Remarquons aussi que tous les pays n'ont pas adopté un décalage d'un nombre entier d'heures avec le Temps Universel comme l'Inde qui a adopté 5h 30m. les pays adoptant une heure d'été ajoutent une heure au décalage ci-dessous pour leur période d'été.

