

# UT, TE, UTC, TAI....



Les astronomes ...  
...à la recherche du temps perdu ?

DAAC

9 et 10 janvier 2018  
Mesurer le temps ?

CRAL

Sylvie Thiault

# Mesure ou repère de temps.



Les sociétés humaines ont besoin de repère temporel :

- ✗ pour mesurer des durées ,
- ✗ dater des événements.

Mais quels repères choisir :

- ➔ Le passage du Soleil au méridien ?
- ➔ Les phases de la Lune ?
- ➔ La direction de lever du Soleil ?

Quelle origine des temps ?



# Les unités de mesure du temps

- Les mésopotamiens ont divisé le jour en 12 parties égales.
- Pourquoi 12 ?
- 12 lunaisons par an ?
- 12 phalanges ?
- 
- La base 60 des babyloniens à l'origine de la division de l'heure en 60 minutes, de la minute en 60 secondes.

# Les heures

Division en 12 du lever au coucher du Soleil.  
Division en 12 de la nuit.



- 
- 
- Ce sont des heures inégales !  
Problème avec les marqueurs de temps réguliers ( sablier, clepsydre)

<http://www.mariellebrie.com/wp-content/uploads/2017/06/water-clock.jpg>

# La seconde

Une seconde représente  $1/86400$  jour solaire moyen.

C'est aussi le rythme cardiaque humain moyen...

Période d'un pendule simple : mais dépend du lieu !

# La précision des garde-temps pour se repérer en mer.

La latitude d'un lieu se détermine par l'observation...  
Mais comment déterminer la longitude ?

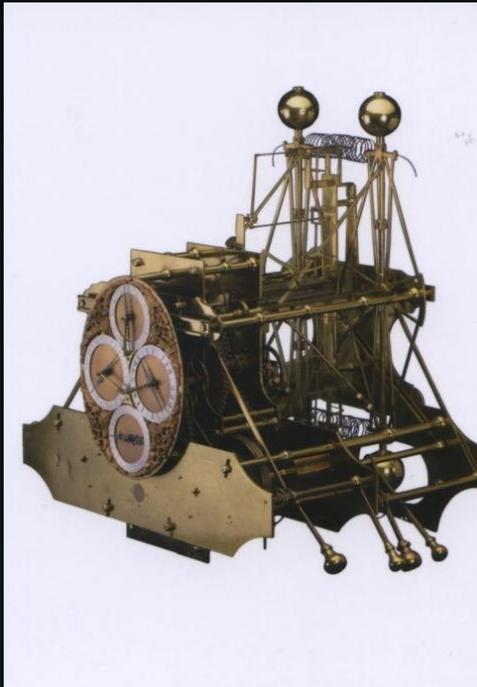
Il est nécessaire de conserver l'heure du méridien d'origine.

On déduit la longitude de l'observation :  
du passage du Soleil au méridien,  
de l'occultation d'étoiles par la Lune

# La détermination de la longitude

1714 : le parlement britannique offre 20000 livres sterling pour qui proposera un dispositif qui donnera une erreur de moins de  $0,5^\circ$  en 42 jours de mer

1736 : John Harrison gagne le prix !



Première horloge de marine de Harrison  
Musée de la marine Greenwich



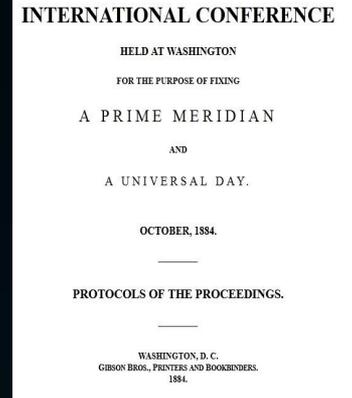
Chronomètre de marine Breguet

# Le Le temps universel (UT)

La Conférence Internationale de Washington **définit le temps universel** dans son « Final Act » du 1 décembre 1884.

- \* la Conférence recommande l'adoption d'un méridien origine unique.
- \* la Conférence propose « ... » l'adoption du méridien passant par la méridienne de l'observatoire de Greenwich comme méridien initial ...
- \* ...
- \* la conférence recommande l'adoption d'un jour universel....
- \* ...ce jour universel doit être le jour moyen solaire ; qu'il doit commencer partout dans le monde à l'instant du minuit moyen au méridien initial, ce qui doit coïncider avec le début du jour civil de ce méridien...

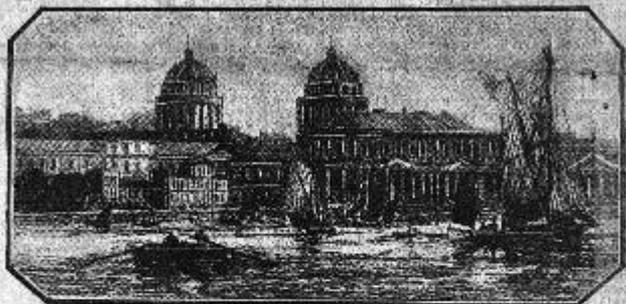
La seconde reste le  $1/86400$  d'un jour solaire moyen



# Le temps universel (UT)

## Dix minutes de plus

### LA NOUVELLE HEURE



L'observatoire de Greenwich. (d'après une eau-forte de Ballin.)

De par la loi, Paris et la France tout entière possèdent depuis hier soir, à minute précise, une nouvelle heure.

La modification de l'heure légale française et son remplacement par l'heure du méridien de Greenwich, qui se traduit de 9 minutes et 21 secondes sur la grande moyenne de Paris, est passée pour ainsi dire inaperçue.

Il n'en est pas été de même sous la Restauration.

Lorsqu'en effet, le préfet de la Seine, M. de Chabrol voulut, sous la seconde Restauration, modifier l'heure de Paris et remplacer l'heure vraie par l'heure du temps moyen, qui n'en diffère que de quelques minutes, la crainte de mécontenter la population parisienne le fit longtemps hésiter.

M. de Chabrol croyait que le changement des heures de repos pouvait soulever les colères ouvrières et provoquer quelques émeutes.

C'est beaucoup plus pacifiquement, et sans aucune solennité, que l'on a procédé hier au changement de l'heure dans la plupart des administrations publiques.

#### A l'Observatoire

Dans la chambre des pendules, située au rez-de-chaussée de l'Observatoire, c'est M. Boquet, chef du service de l'heure, qui retardé les aiguilles des horloges de 9 minutes et 21 secondes.

— C'est à 3 heures 30 minutes, nous dit M. Boquet, que nous avons procédé au changement de l'heure. L'heure extérieure de l'Observatoire marque cela maintenant l'heure légale de demain.

Deux horlogers viennent de partir pour régler ce soir les autres horaires de la place Daubert et de la mairie des Gobelins.

« Demain matin, de huit heures à dix heures et demi, ils régleront les treize autres cadrans horaires situés : rue Kléber, avenue Rapp, place Saint-Philippe du Roule, place de la Trinité, à la mairie du deuxième arrondissement, mairie du sixième arrondissement, à la Sorbonne, à l'école-maternelle des pompiers, en face du Palais de Justice, à

l'Hôtel de Ville et à son annexe, à l'école du boulevard Diderot et enfin aux mairies des dixième et onzième arrondissements.

Quant à l'heure envoyée par la T. S. F. aux navires en mer, combat M. Bocquet, ce sera toujours l'heure du temps moyen de Paris jusqu'au 30 juin prochain.

« A partir de cette date, l'heure sera envoyée deux fois par jour, à 10 heures 45 le matin et 11 heures 45 le soir, d'après la nouvelle heure légale adoptée. »

#### L'heure unifiée dans les gares

Dans les gares et les bureaux de poste et télégraphes, l'heure nouvelle ne fait son apparition qu'à minute précise.

A minute, les horloges extérieures des gares furent arrêtées et elles ne furent remises en marche que 9 minutes et 21 secondes après.

Les horloges intérieures furent également arrêtées à minute, mais comme elles retardaient de cinq minutes déjà par rapport à l'heure extérieure, elles furent remises en marche 4 minutes et 21 secondes après leur arrêt.

**A PARTIR D'AUJOURD'HUI, LES HORLOGES EXTERIEURES ET INTERIEURES DES GARES MARQUERONT DONC LA MEME HEURE, L'HEURE DE L'EUROPE OCCIDENTALE.**

#### L'heure de la justice

A propos de la nouvelle heure légale, M. le président Munier vient de rédiger, à l'adresse des magistrats du tribunal de la Seine, la circulaire suivante :

Le président du tribunal de la Seine a l'honneur de rappeler à ses collègues que la nouvelle heure légale sera appliquée, dès demain samedi, 11 mars.

Elle constitue un retard de 9 minutes 21 secondes. Exemple : une pendule, qui marque en ce moment 11 heures 1/2, portera désormais 11 heures 21.

Il les prie de vouloir bien en tenir compte pour l'ouverture des audiences, enquêtes, etc., etc.

Il faudra attendre le décret du 11 mars 1911 pour que le temps universel soit adopté en France.

« l'heure légale en France est le temps moyen de Paris retardé de 9m 21s et augmenté de douze heures. »

Pourquoi 9m21s ?

Longitude de Paris : 2°20'12"E

Longitude de Greenwich : 0° par définition !

Pourquoi augmenté de 12h ?

( Le matin du 11 mars 1911)

# Le temps universel (UT)

On sait depuis la fin du XVIII<sup>e</sup> que la Lune accélère...

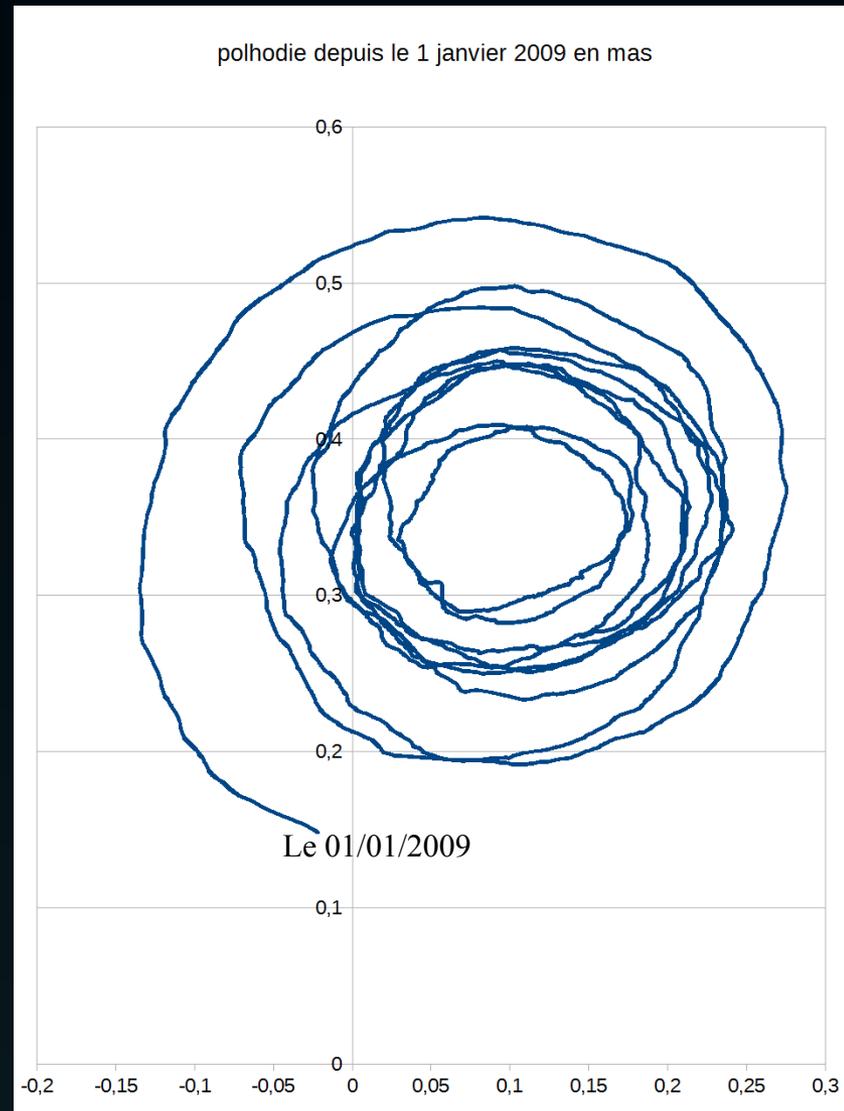
On sait qu'il faut faire des corrections pour la position des étoiles, les instants des éclipses...

Ralentissement de la rotation de la terre :

- par frottement des marées.
- déplacement irrégulier du pôle
- variations saisonnières dues aux grands déplacements des masses atmosphériques.
- variations à long terme dues aux grands courants de convection interne du magma interne de la Terre.

syrté

Calcul d'amplitude de la polhodie en km  
( rayon de courbure de la Terre aux poles :  
6350km)



Il existe plusieurs UT.

## UT1, UT2, Utx...

UT1 : Temps de la rotation de la Terre déterminé par l'IERS à partir principalement de l'observation des quasars extra galactiques par la technique VLBI (Interférométrie à très longue base).

UT1 n'est pas uniforme . En effet la rotation de la Terre autour de son axe, ralentit sur le long terme, à cause principalement des effets d'attraction luni-solaire. De plus, notre planète est perturbée par ses constituants internes (noyau, manteau) et externes (atmosphère, océans) qui modifient sa rotation.

La rotation de la Terre n'étant pas uniforme, UT1 possède une incertitude de  $\pm 3\text{ms}$  par jour.

Et aussi : UT1R, UT2

## Le temps des éphémérides (TE)

En 1956, le Comité International des Poids et Mesures (CIPM) décide d'abandonner la référence au mouvement de rotation de la Terre au profit de son mouvement orbital .

L'équation de définition de T est l'expression numérique de la longitude moyenne du soleil résultant des travaux de Newcomb:

$$L_0 = 279^\circ 41' 48.04'' + 129602768.13''T + 1.089''T^2 ,$$

exacte par définition

T mesuré en siècle julien de 36 525 jours des éphémérides depuis T=0, soit lorsque  $L_0 = 279^\circ 41' 48''.04$

Par convention l'origine du T.E. a été prise lors de l'hiver 1899-1900 lorsque la longitude moyenne du soleil valait  $L_0 = 279^\circ 41' 27,54''$  (JD=2 415 020.0). Cet instant est noté 31 décembre 1899 0h TE. En 1989 on avait TE-UT1=56s

# Le Temps des éphémérides (TE)

*La seconde est la fraction  $1/31.556.925,9747$  de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides.*

L'échelle de temps qui lui correspond est le **Temps des Éphémérides (TE)**

## **Détermination du TE :**

Théoriquement, la détermination du TE est obtenue en mesurant la position du Soleil par rapport à des étoiles de coordonnées connues.

Pratiquement, une telle mesure ne peut évidemment pas être effectuée directement.

En fait, la détermination de TE était réalisée en mesurant la position de la Lune par rapport à des étoiles de coordonnées connues, après avoir étalonné cette horloge secondaire par rapport au mouvement en longitude du Soleil.

# Le Temps des éphémérides (TE)

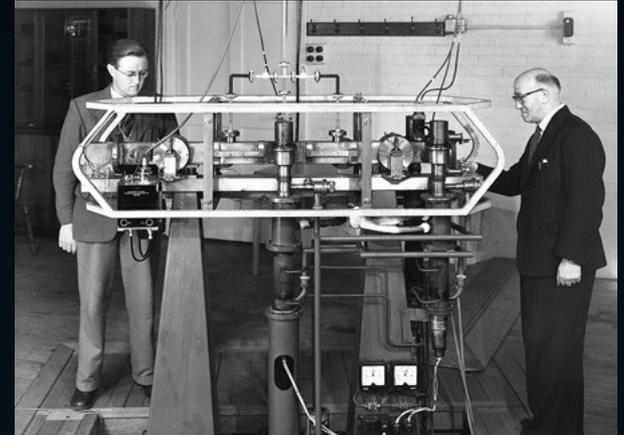
**Précision** : 0,1s par an soit 1s en 10 ans.

A peine définie, elle est dépassée !

En 1955 : première horloge atomique au Césium.

(Essen et Parry)

Précision  $10^{-12}$ s par an !



En 1967 – 13ème Conférence Générales des Poids et Mesures (CGPM)  
adoption de la seconde atomique comme unité de temps

Le temps des éphémérides est toujours utilisé, car il joint :

- Les données anciennes
- Les données à très longs termes calculées par les théories planétaires.

# Le Temps atomique International (TAI)

*La seconde est la durée de 9.192.631.770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de Césium 133.*

*L'échelle de temps qui en découle est le Temps Atomique International (TAI) :*

*Le TAI est la coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau International de l'Heure (remplacé maintenant par le Bureau International des Poids et Mesures) 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.*

*Le 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.***

# Horloge atomique

L'énergie d'un atome ne peut prendre que des valeurs bien précises.

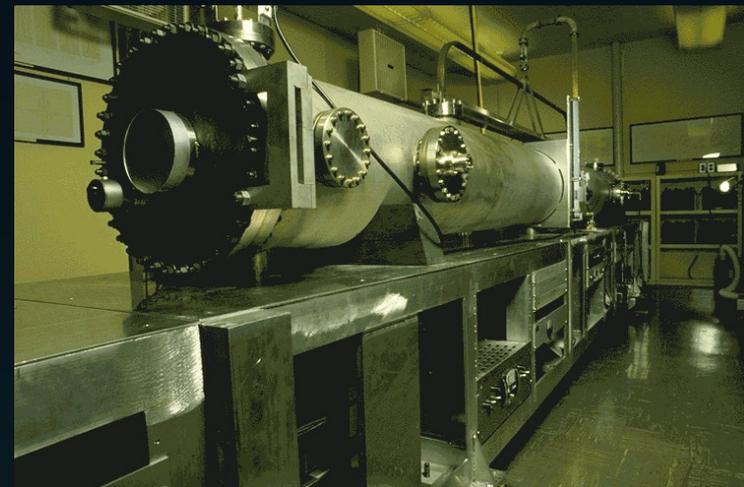
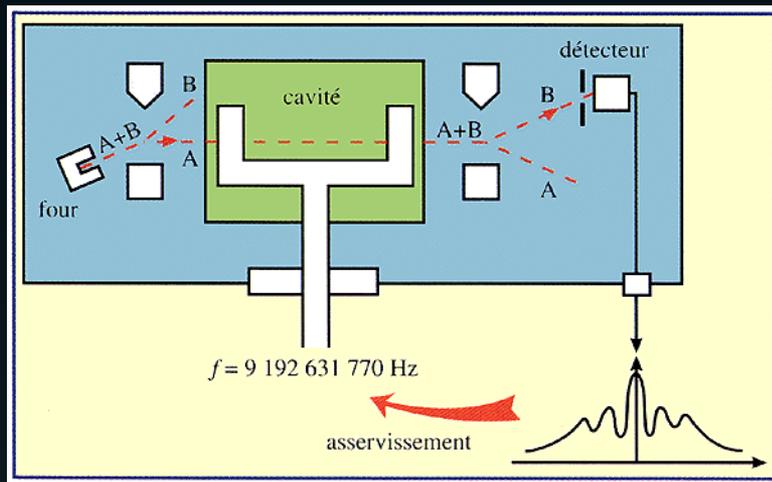
Pour faire passer un atome d'un niveau d'énergie à un autre plus élevé, il doit recevoir ou émettre un photon d'énergie correspond exactement à la différence d'énergie entre le niveau final et le niveau initial.

$$E = h \nu \quad \lambda = \frac{c}{\nu}$$

Atome de césium  $^{133}\text{Cs}$

Transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental  $6^2\text{S}_{1/2}$

$$\nu = 9.192.631.770 \text{ Hz}$$
$$\lambda = 3,26 \text{ cm}$$

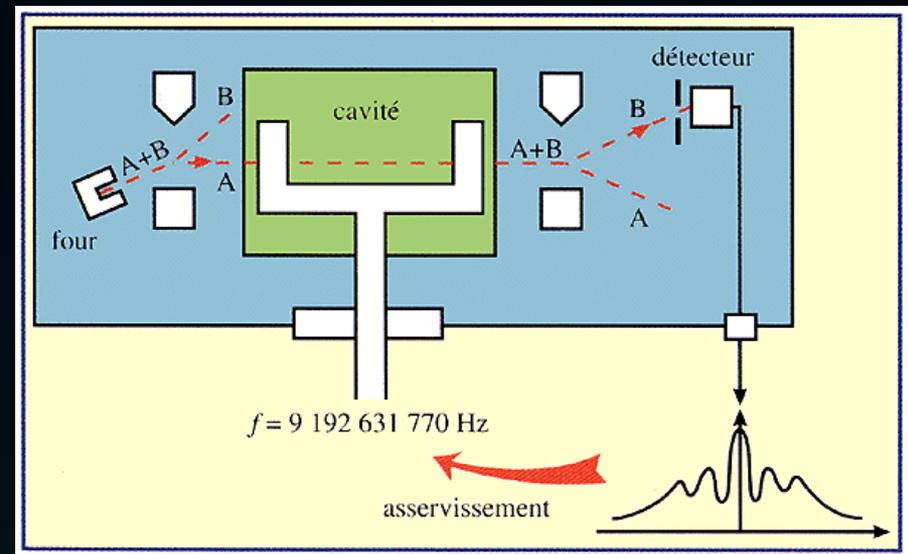


Horloge atomique à jet de césium

# Horloge atomique

- 1 - un oscillateur à quartz génère un signal électrique de fréquence 10 MHz aussi exactement que possible ;
- 2 - multiplication de la fréquence de base du signal 9.192.631.770 Hz ;
- 3 - signal injecté dans un guide d'onde avec résonance (cavité de Ramsey) ;
- 4 - un jet d'atomes de césium 133, dans deux états d'énergie différents ;
- 5 - déflection magnétique, seuls les atomes dans l'état d'énergie A pénètrent dans la cavité de Ramsey ;
- 6 - si la fréquence injectée = 9.192.631.770 Hz, nombre élevé d'atomes passant de l'état A à l'état B ;
- 7 - séparation magnétique des atomes dans l'état A et l'état B ;
- 8 - un détecteur compte le nombre d'atomes reçus dans l'état B ;
- 9 – asservissement de la fréquence du quartz : nombre d'atomes détectés dans l'état B soit maximal.

L'horloge atomique est un *oscillateur à quartz* asservi par un système atomique à jet de césium : c'est un étalon passif.



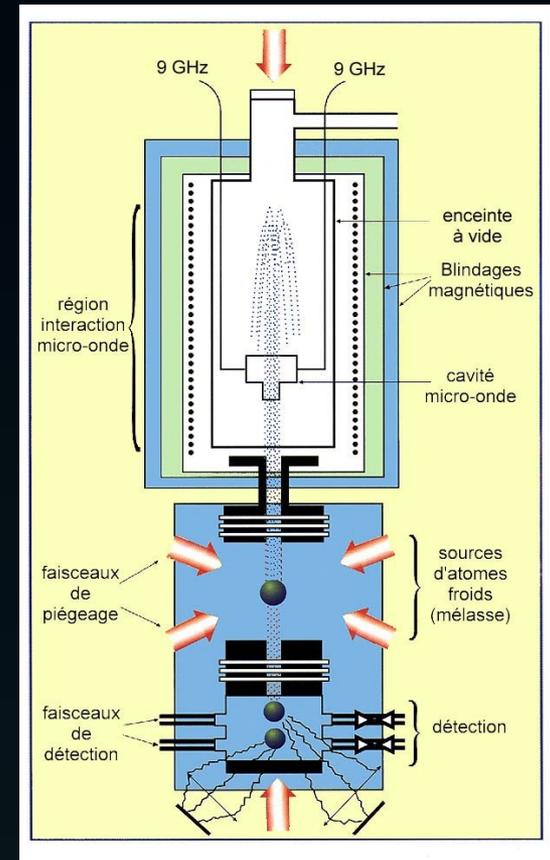
# Horloges atomiques

## Types :

- horloges atomiques à césium (jets de césium ou fontaines à césium)
- masers à hydrogène
- horloges à cellule de rubidium, à ions mercure.

## Précision :

Horloge	exactitude	dérive 1 seconde
• jets thermiques au Cs	$6 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^6$ années
• fontaines atomiques de Cs	$\sim 10^{-15}$	$15 \cdot 10^6$ années



# Utilisation des horloges atomiques

## Horloges au césium

- métrologie et établissement du Temps Atomique International (TAI)
- navigation et positionnement (système GPS)
- recherche fondamentale (géophysique, géodésie, astronomie, astrophysique)

## Horloges au rubidium

- synchronisation des réseaux nationaux et internationaux de télécommunication
- navigation et positionnement
- instrumentation de mesure

## Horloges à hydrogène

- recherche fondamentale - TAI
- Interférométrie à longue base (VLBI)
- Orbitographie de précision
- Métrologie



## Le calcul du temps atomique

- Le temps atomique international (TAI) est calculé par le Bureau international des poids et mesures (BIPM).
- Les étalons primaires de fréquences (horloges à césium de grande précision entretenues par les laboratoires nationaux) : fournissent une seconde de référence la plus proche possible de la seconde SI.
- Les horloges atomiques (cesium, masers ) : une excellente stabilité à long terme, faible variabilité autour de la seconde moyenne produite
- Le TAI est une moyenne pondérée des données collectées.
- La stabilité à long terme du TAI est assurée par un choix « judicieux » du « poids » des différentes horloges dans le calcul du TAI.
- L'unité de TAI est maintenue la plus proche possible de la définition de la seconde SI, en comparant les données fournies par les étalons primaires.

# TU, TE et TAI

Base de l'unité de seconde : la seconde TE 1900.

Raccordement TU / TAI : 1er janvier 1958 à 20h U.T.

Raccordement TE – TAI :  $TE = TAI + 32,184 \text{ s.}$

# Et UTC ?

Diffusé par les émetteurs radios.

C'est celui de l'horloge parlante décalé d'une ou deux heures (été-hiver).

UTC est un compromis

- Il est basé sur le TAI
- Raccordé au UT2

UT et TAI diverge : irrégularités de UT et ralentissement de la rotation de la Terre

De temps à autres ajustements par saut entier d'une seconde

## Et UTC ? UTC ?

C'est le temps légal du méridien de Greenwich.

<https://www.worldtimeserver.com/heure-exacte-UTC.aspx>

# UT, UTC et TAI

L'utilisation du Temps atomique international, très stable, entraîne un décalage avec la rotation de la Terre → il faut recaler cette échelle de temps régulièrement pour que midi reste à midi...

Quand le décalage UT et UTC atteint 0,9 seconde, on décrète un saut d'une seconde à une date déterminée.

Dernier saut de temps UTC le 1 janvier 2017.

31 décembre 2016	23h 59m 59s
31 décembre 2016	23h 59m 60s
1 janvier 2017	0h 00m 00s

Actuellement TAI-UTC=37s

# Les secondes intercalaires

INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE (IERS)

SERVICE INTERNATIONAL DE LA ROTATION TERRESTRE ET DES SYSTEMES DE REFERENCE

SERVICE DE LA ROTATION TERRESTRE DE L'IERS  
OBSERVATOIRE DE PARIS  
61, Av. de l'Observatoire 75014 PARIS (France)  
Tel. : +33 1 40 51 23 35  
e-mail : services.iers@obspm.fr  
<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc>

Paris, 05 July 2018

Bulletin C 56

To authorities responsible  
for the measurement and  
distribution of time

## INFORMATION ON UTC - TAI

NO leap second will be introduced at the end of December 2018.  
The difference between Coordinated Universal Time UTC and the  
International Atomic Time TAI is :

from 2017 January 1, 0h UTC, until further notice :  $UTC-TAI = -37 \text{ s}$

Leap seconds can be introduced in UTC at the end of the months of December  
or June, depending on the evolution of UT1-TAI. Bulletin C is mailed every  
six months, either to announce a time step in UTC, or to confirm that there  
will be no time step at the next possible date.

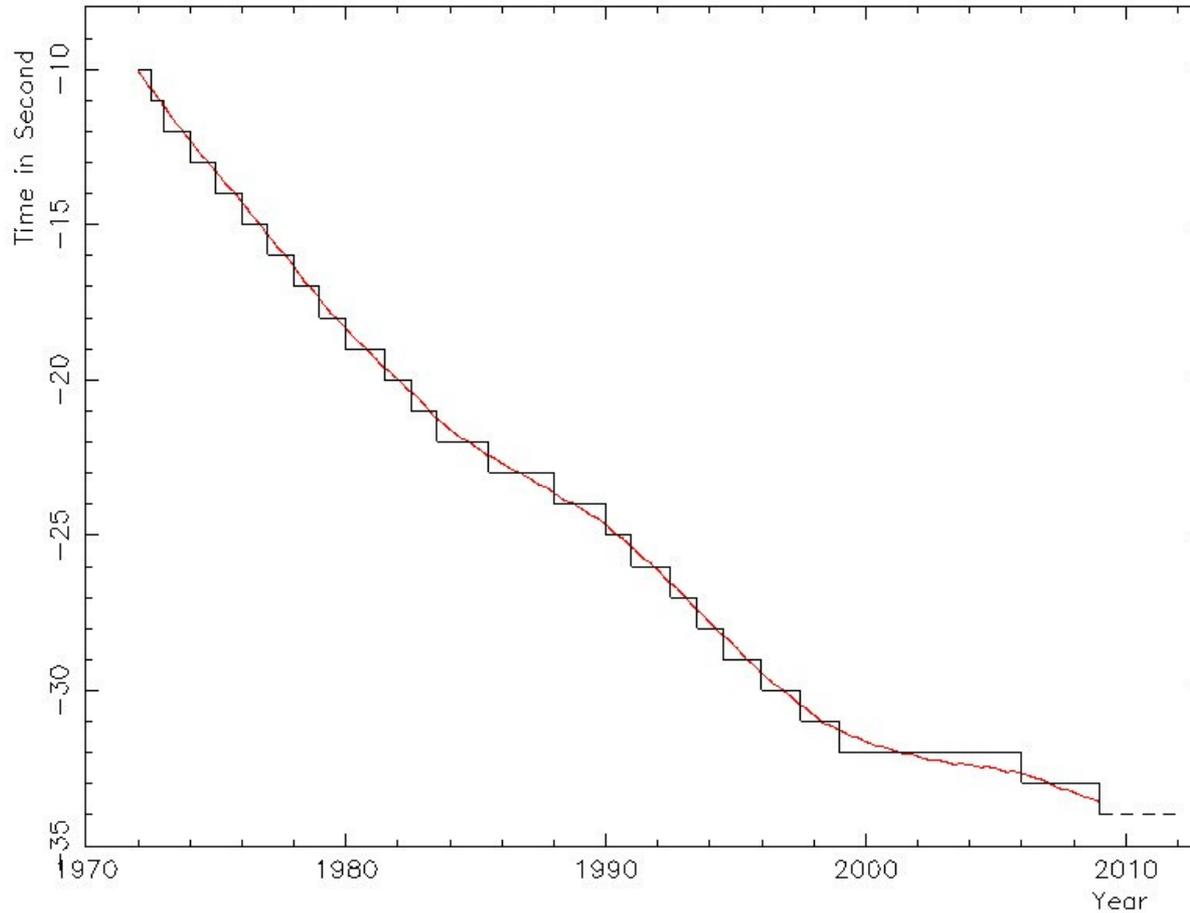
Christian BIZOUARD  
Director  
Earth Orientation Center of IERS  
Observatoire de Paris, France

# Les secondes intercalaires

```
# Value of TAI-UTC in second valid between the initial value until
# the epoch given on the next line. The last line reads that NO
# leap second was introduced since the corresponding date
# Updated through IERS Bulletin 56 issued in July 2018
#
#
# File expires on 28 June 2019
#
#
#      MJD          Date          TAI-UTC (s)
#      ---          -
#      day month year
#      -----
#
41317.0    1  1 1972    10
41499.0    1  7 1972    11
41683.0    1  1 1973    12
42048.0    1  1 1974    13
42413.0    1  1 1975    14
42778.0    1  1 1976    15
43144.0    1  1 1977    16
43509.0    1  1 1978    17
43874.0    1  1 1979    18
44239.0    1  1 1980    19
44786.0    1  7 1981    20
45151.0    1  7 1982    21
45516.0    1  7 1983    22
46247.0    1  7 1985    23
47161.0    1  1 1988    24
47892.0    1  1 1990    25
48257.0    1  1 1991    26
48804.0    1  7 1992    27
49169.0    1  7 1993    28
49534.0    1  7 1994    29
50083.0    1  1 1996    30
50630.0    1  7 1997    31
51179.0    1  1 1999    32
53736.0    1  1 2006    33
54832.0    1  1 2009    34
56109.0    1  7 2012    35
57204.0    1  7 2015    36
57754.0    1  1 2017    37
```

# Les secondes

Ecart entre TU ( en rouge) et **intercalaires** (en noir)



# L'heure légale

Les États définissent l'heure légale sur leur territoire à l'aide d'un décalage fixe par rapport au temps universel coordonné (UTC). Ce décalage est le plus souvent égal à un nombre entier d'heures, mais certains pays emploient un décalage à la demi-heure, voire au quart d'heure.

Exemples :

- France : UTC +1H en hiver/ UTC +2H en été.
- Inde : UTC + 5h30
- Nepal : UTC +5h45



## Les différentes définitions de la seconde depuis 1956

CIPM 1956	définition de la seconde comme la fraction de l'année tropique 1900
11ème CGPM 1960	ratifie la définition de la seconde donnée par le CIPM en 1956
CIPM 1964	déclare que l'étalon à employer est la transition hyperfine du césium 133
12ème CGPM 1964	donne pouvoir au CIPM de désigner les étalons de fréquence atomique et moléculaire à employer
13ème CGPM 1967/1968	définit la seconde au moyen de la transition du césium
CCDS 1970	définit le Temps atomique international, TAI
14ème CGPM 1971	demande au CIPM de définir et d'établir le Temps atomique international, TAI
15ème CGPM 1975	sanctionne le Temps universel coordonné, UTC
26ème CGPM nov2018	Définit 7 constantes fondamentales de la physique Définit la seconde à partir de ces constantes fondamentales

# Définition de la seconde qui entrera en vigueur le 1 mai 2019

## Annexe 3. Les unités de base du SI

La nouvelle définition du SI décrite ci-dessus, fondée sur les valeurs numériques fixées des constantes choisies, permet de déduire la définition de chacune des sept unités de base du SI à l'aide d'une ou plusieurs de ces constantes, selon les cas. Les définitions qui en découlent, qui prendront effet à compter du 20 mai 2019, sont les suivantes :

- ◆ La seconde, symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à  $\text{s}^{-1}$ .

Source : CR de la 26ème CGPM de nov 2018 Versailles



Montres molles S.Dali

Les échelles de temps sont liées entre elles.

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.

# Netographie

[http://perso.utinam.cnrs.fr/~vernotte/echelles\\_de\\_temps.html](http://perso.utinam.cnrs.fr/~vernotte/echelles_de_temps.html)

[http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages\\_mesure-temps/introduction-mesure-temps.html](http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_mesure-temps/introduction-mesure-temps.html)

[http://www.bipm.org/fr/practical\\_info/time\\_server.html](http://www.bipm.org/fr/practical_info/time_server.html)

<http://www.imcce.fr/fr/grandpublic/systeme/promenade/pages3/325.html>

<http://tempsatomique.chez.com/nouvellepage2.htm>

<http://tempsatomique.chez.com/nouvellepage3.htm>

<http://tempsatomique.chez.com/horlogescesium.htm>

<http://pgj.pagesperso-orange.fr/deltaT.html>

<http://www.horloge-parlante.com/fr/index.html>

**Des expositions virtuelles :**

<http://expositions.bnf.fr/ciel/index.htm>

<http://mesuredutemps.obspm.fr/>

# Bibliographie :

## Les cahiers Clairaut du CLEA

- N° 73, Printemps 1996 SUAGHER, Françoise La mesure du temps (1) p.2-6
- N° 74, Été 1996 SUAGHER, Françoise La mesure du temps (1)p.16-20
- N° 76, Hiver 1996 SUAGHER, Françoise La mesure du temps (3) : L'invention de la seconde
- N° 77, Printemps 1997 SUAGHER, Françoise La mesure du temps (4) : Les temps modernes p.24-26
- N° 82, Été 1998 SUAGHER, Françoise Le temps au XXIème siècle (1) p.2-6
- N° 83, Automne 1998 SUAGHER, Françoise Le temps au XXIème siècle (2) p.2-6
- N°147 Automne 2014 thème : le temps

La Recherche Hors série « le temps » dossiers N°20 daté décembre 2016-janvier 2017