

Les définitions astronomiques de la seconde et leurs réalisations

Nicole Capitaine

SYRTE - Observatoire de Paris,
PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC
Bureau des longitudes

Introduction

- Dès l'antiquité, l'homme a utilisé les cycles astronomiques naturels pour mesurer le temps et régler sa vie sociale, agricole, religieuse et économique:
 - Alternance jour/nuit et mouvement apparent des étoiles dus à [la rotation de la Terre](#),
 - → Temps solaire (vrai/moyen) → base de la [1^{ère} définition de la seconde](#)
 - succession des saisons et rotation annuelle de la voute céleste, dues à [la révolution de la Terre autour du Soleil](#),
 - → Temps des éphémérides → base de la [2^e définition de la seconde](#)
- La [mesure du temps](#) a ainsi été naturellement basée sur l'astronomie par [l'observation du Soleil et des astres](#) :
 - gnomons, cadrans solaires, astrolabes, nocturlabes, ...
 - lunettes méridiennes, lunettes zénithales, astrolabes de Danjon, PZT, ...
- L'homme a également conçu des instruments de mesure du temps qui se basent sur d'autres phénomènes liés à l'écoulement du temps:
 - clepsydres, sabliers, ...
 - horloges mécaniques, horloges à quartz, horloges atomiques, ..

Instruments anciens pour mesurer l'écoulement du temps



gnomon



cadran solaire



**Clepsydre
(horloge à eau)**



sablier



bougie



astrolabe



notcturlabe



horloge



chronomètre de marine



montre

La seconde atomique a 50 ans - Paris, 13 octobre 2017

3

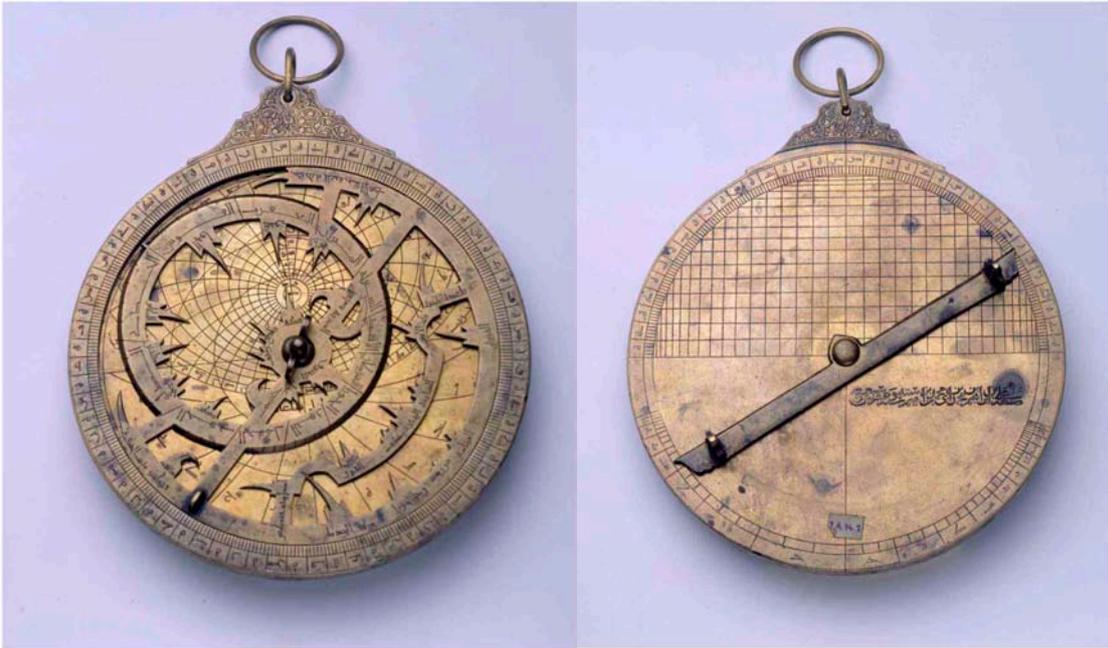
Clepsydre (fac-similé)



Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

© Bibliothèque de l'Observatoire de Paris - Alidade (Accès en Ligne aux Instruments, Documents et Archives De l'astronomie) -

Astrolabe syro-egyptien d'Ali ben Ibrahim, Damas 1326



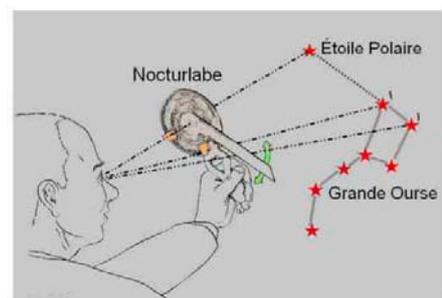
Bibliothèque de l'Observatoire de Paris - Alidade (Accès en Ligne aux Instruments, Documents et Archives De l'astronomie) Bibliothèque de l'Observatoire de Paris - Alidade (Accès en Ligne aux Instruments, Documents et Archives De l'astronomie)
Octobre 2017

Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

La seconde atomique a 50 ans - Paris, 13 octobre 2017

5

Nocturlabe (16^e siècle)



Crédit: J-C. Mayet

Détermination de l'heure la nuit par la position d'une étoile dans le ciel

Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Bibliothèque de l'Observatoire de Paris - Alidade (Accès en Ligne aux Instruments, Documents et Archives De l'astronomie) -

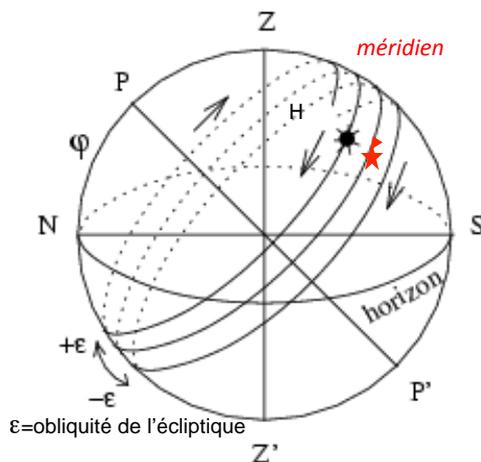
6

Heure et seconde d'heure

- Dès l'antiquité, le jour (période d'éclairement par le Soleil) et la nuit étaient divisés chacun en 12 h, de durée inégales entre le jour et la nuit, sauf aux équinoxe ou sur l'équateur:
 - heures temporaires (en usage jusqu'au 15^e siècle)
 - heures équinoxiales de durée égale entre deux passages successifs du Soleil au méridien (jour solaire vrai).
- Le découpage du temps (1 heure = 60 minutes = 60 x 60 secondes) et la division sexagésimale des angles résulte de l'usage, par les astronomes Grecs des méthodes de calculs numériques babyloniennes qui se faisaient uniquement en base 60.
- L'étymologie du mot « seconde » provient de la francisation écourtée de l'expression *minutum secunda* en latin médiéval, qui signifie littéralement minute de second rang, c'est-à-dire seconde division de l'heure.

Temps solaire vrai et temps solaire moyen

axe ZZ' = verticale du lieu; H = angle horaire



*A midi, temps solaire vrai local,
le Soleil culmine au méridien*

Mouvement apparent du Soleil sur la sphère locale:
approximativement un cercle parallèle à l'équateur terrestre, dont la latitude est égale à la déclinaison du Soleil (qui varie au cours de l'année de $-\epsilon$ à $+\epsilon$).

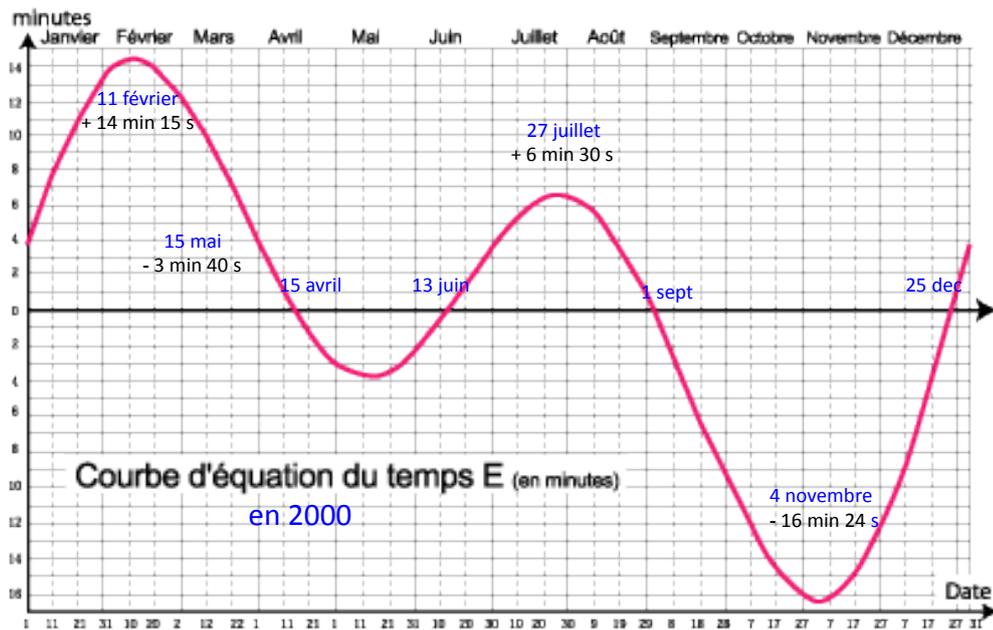
Ce mouvement présente des inégalités qui suivent une courbe bien définie par les calculs astronomiques (équation du temps: E).

$$\text{Temps solaire vrai} = H \odot$$

On substitue un Soleil « moyen fictif », \star , se mouvant de façon uniforme sur l'équateur et coïncidant avec le Soleil aux équinoxes.

$$\text{Temps solaire moyen} = H_m = H \odot + E$$

Equation du temps



Temps solaire moyen = temps solaire vrai + E (inégalité connue dès l'Antiquité)
 $[E \sim 460 \text{ s} \sin M - 592 \text{ s} \sin 2(\varpi + M)]$ (M : anomalie moyenne du Soleil; ϖ : longitude du périhélie)

Heure solaire vraie, moyenne et universelle

- **Temps solaire vrai**: Midi solaire vrai est l'instant où le Soleil passe au méridien du lieu; il atteint son point de culmination.
- **Jour solaire**: intervalle entre 2 passages du Soleil au méridien d'un lieu.
- L'heure utilisée jusqu'au milieu du 18^e siècle était l'heure solaire « vraie »; qui a deux défaut majeurs : elle n'est pas uniforme et elle dépend de la longitude du lieu.
- Il faut ajouter E à l'heure solaire vraie pour obtenir l'heure solaire moyenne du lieu; elle est indiquée sur les cadrans solaires (analemme).
- **Jour solaire moyen**: intervalle entre 2 passages du Soleil moyen au méridien d'un lieu. Adoption du **temps solaire moyen à Paris en 1826**.
- Durant la 2^e partie du 19^e siècle, l'exploitation des chemins de fer exige l'emploi d'une heure unique, au moins à l'échelle nationale. La loi du 14 mars 1891 en France impose l'heure du méridien de Paris.
- L'unification mondiale de l'heure a été recommandée par une conférence internationale (Washington, 1884): adoption d'un **premier méridien unique** (Greenwich) et d'une **heure universelle**. De plus, le jour universel devait commencer à minuit et devait être comptée de 0 à 24 h (TU).
- En France, le méridien de Greenwich est adopté en même temps que l'heure légale : « heure du temps moyen de Paris retardée de 9 min 21s » (loi du **9 mars 1911**).



Les horlogers de Paris prenant l'heure au régulateur de l'Observatoire

Dessin de CLAVERIE — Voir l'article, page 239

1877

La seconde atomique a 50 ans - Paris, 13 octobre 2017

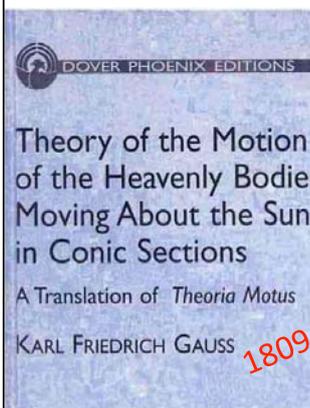
13

Source: *Observatoire de Paris*

Première définition astronomique de la seconde

- Unité de temps utilisé en astronomie: siècle ou année, jour solaire vrai, puis jour solaire moyen.
- La seconde, unité de temps, est définie comme la fraction $1/86\,400$ du jour solaire moyen.
- Cette définition est restée en vigueur jusqu'en 1960.
- Cette définition a été tacitement et universellement adoptée mais n'a jamais été officiellement entérinée, ni par le système métrique adopté en France en 1799 (m, kg), ni par les organismes chargés de la métrologie mondiale issu de la Convention du mètre (1875).

Seconde de temps moyen, unité de temps



2

RELATIONS PERTAINING SIMPLY

[Book I.

IV. For different bodies moving about the sun, the squares of these quotients are in the compound ratio of the parameters of their orbits, and of the sum of the masses of the sun and the moving bodies.

Denoting, therefore, the parameter of the orbit in which the body moves by $2p$, the mass of this body by μ (the mass of the sun being put = 1), the area it describes about the sun in the time t by $\frac{1}{2}g$, then $\frac{g}{t\sqrt{p}\sqrt{1+\mu}}$ will be a constant for all heavenly bodies. Since then it is of no importance which body we use for determining this number, we will derive it from the motion of the earth, the mean distance of which from the sun we shall adopt for the **unit** of distance; the mean solar day will always be our **unit** of time. Denoting, moreover, by π the

En 1809, Gauss propose d'utiliser le **jour solaire moyen** comme unité de base du système de constantes astronomiques,

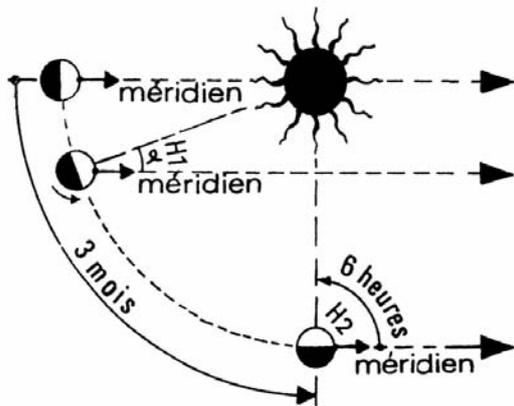
En 1832, Gauss propose d'utiliser **la seconde de temps moyen** dans son système d'unités de mètre-milligramme,

En 1862: l'Association britannique pour l'avancement des sciences (BAAS) a accepté cette unité de temps, puis dans les systèmes CGS (1874), MKS (1946) et SI (1960).

Evolution des déterminations astronomiques de temps et des horloges mécaniques (ou « garde-temps »)

- Les mesures des instants de passages méridiens du Soleil peu précises sont remplacées par des observations méridiennes ou extra-méridiennes d'étoiles faites en de nombreux observatoires.
- On détermine alors le **Temps sidéral** (que l'on convertit en Temps solaire moyen).
- On doit utiliser des « **garde-temps** » pour conserver le temps entre les observations astronomiques.
- Les premières horloges mécaniques à poids (14^e siècle), ont une faible exactitude (~ 2 h de dérive par 24 h) qui rend l'aiguille des minutes inutiles. Cela impose la remise à l'heure par les cadrans solaires et les méridiennes associées.
- La précision des horloges est considérablement améliorée au 17^e siècle par des innovations:
 - l'« échappement », qui permet alternativement de libérer puis de bloquer la chute du poids, grâce à un mécanisme oscillant,
 - l'invention de **l'horloge à pendule** par Huygens dans les années 1660,
- Dès 1670, les horloges peuvent indiquer aux astronomes les secondes avec une bonne fiabilité. Elles tiennent 1 s par jour.

Temps solaire moyen – Temps sidéral



Angle horaire du Soleil/angle horaire d'une étoile
Temps solaire moyen/Temps sidéral



Source: Observatoire de Paris

Temps sidéral : angle horaire du point vernal. 1 jour sidéral = 23 h 56 min 04 s
A l'instant du passage au méridien: il est égal à l'ascension droite de l'étoile
Temps sidéral = Temps moyen x 1,0027379

La seconde atomique a 50 ans - Paris, 13 octobre 2017

17

Instrument des passages, Brunner

mi-19^è siècle

Régulateur astronomique à seconde Bréguet,



© Bibliothèque de l'Observatoire de Paris - Alidade (Accès en Ligne aux Instruments, Documents et Archives De l'astronomieE) -
Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

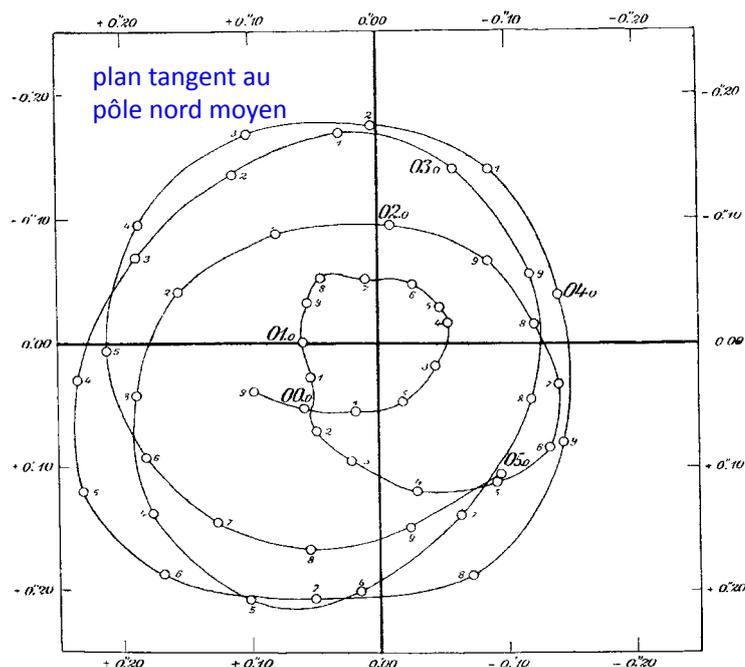
Collection du Bureau des longitudes

18

Organisation internationale pour la détermination de la rotation de la Terre au cours du 20^e siècle

- La définition *d'heure universelle* s'est rapidement révélée insuffisante car:
 - elle ne tient pas compte des mouvements de l'axe de rotation terrestre par rapport à la Terre, découverts à peu près à la même époque et régulièrement mesurés à partir de 1900;
 - elle confie à un seul observatoire la détermination de l'heure universelle, sous forme de correction aux horloges de cet établissement.
- Programmes systématiques pour la détermination régulière du mouvement du pôle: observations de latitude organisés au niveau mondial, dès 1899, par le « *Service international des latitudes* » (SIL) qui se transforma en 1962 en « *Service international du mouvement du pôle* » (SIMP).
- Le SIL, puis le SIMP, publient les coordonnées rectangulaires du pôle instantané, x , y , avec une résolution temporelle de 1/10 d'année.
Le traitement global rigoureux des observations permettait la réalisation d'un repère terrestre conventionnel de référence par rapport auquel le mouvement du pôle était mesuré.
- De la fin du 19^e siècle jusqu'à la fin des années 1980, les observations (de latitude, puis de latitude et de TU) utilisées, étaient obtenues à partir d'observations d'étoiles, dont on suppose les coordonnées connues dans un catalogue de référence.
- Les instruments, tels que l'astrolabe impersonnel de Danjon observant à une distance zénithale fixe, ou la lunette photographique zénithale (PZT) observant au zénith du lieu, ont été spécialement conçus pour améliorer la précision des mesures.

Courbe du mouvement du pôle de rotation de la Terre (polhodie)



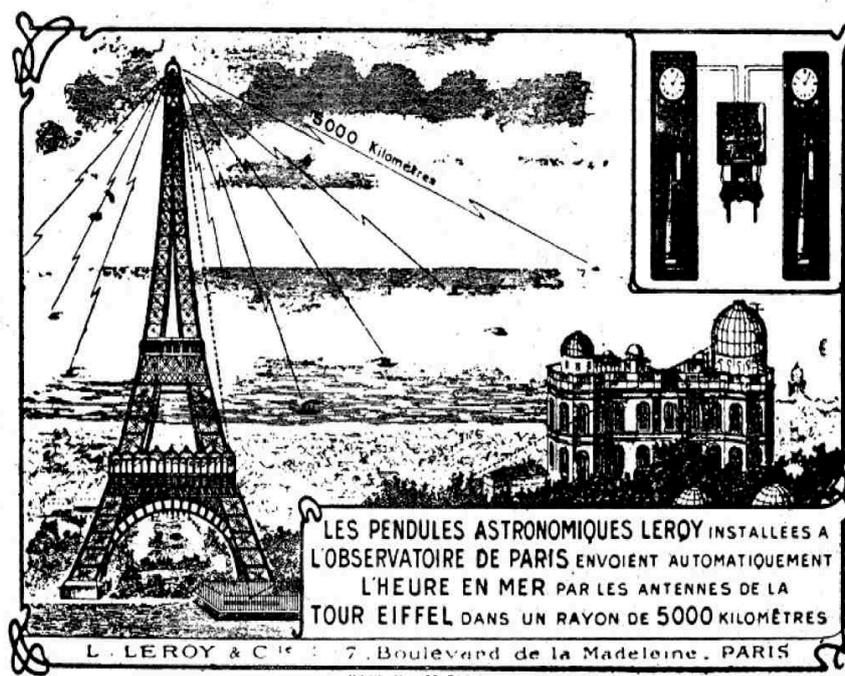
Période 1900-1905

Source: W. Ebert, 1908

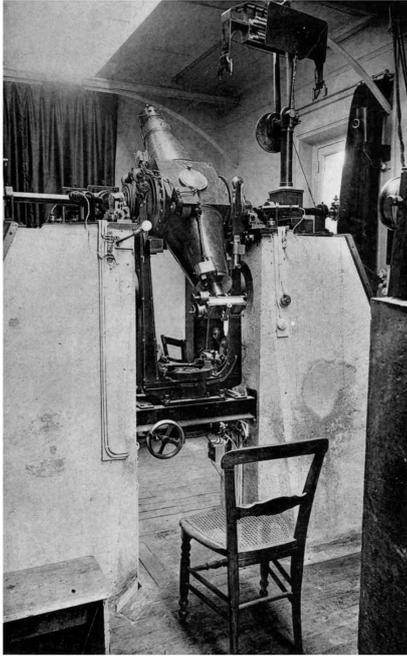
Unification et diffusion de l'heure

- A partir de 1910, UT est disséminé par des signaux horaires radio de divers pays (ceux-ci pouvaient conduire à des écarts d'1 à 2 s, dus aux erreurs de longitude par rapport au méridien de Greenwich, aux erreurs sur les positions d'étoiles, aux temps de propagation radio, etc.).
- Avec les débuts de la TSF, on émet les premiers signaux horaires depuis **l'Observatoire de Paris via l'émetteur de la tour Eiffel**. Diffusion de l'heure nationale, depuis les horloges pilotes situées dans les caves de l'Observatoire, et via l'émetteur de la Tour Eiffel. Transmetteurs signaux horaires.
- On a alors reconnu le besoin d'une « **échelle de temps** » (réalisée), également unique, ainsi que, à la suite des transmissions radio-électriques de signaux horaires par le **Général Ferrié**, la nécessité de créer un organisme chargé d'unifier l'heure.
- Les bases en sont jetées au cours de la **Conférence internationale de l'heure** tenue en octobre 1912 à Paris et présidée par Guillaume Bigourdan, président du Bureau des longitudes. Cela a conduit à la fondation du **Bureau international de l'heure**, BIH.
- En 1919, on a jugé suffisant de faire du BIH un service international rattaché à l'UAI, puis aussi à l'UGGI et à l'URSI.
- **Le BIH a fonctionné à partir de 1919 à l'Observatoire de Paris**, sous la responsabilité du directeur de l'Observatoire de Paris.
- Le BIH faisait alors la synthèse des observations astronomiques dans le monde pour donner l'heure déterminée par l'astronomie.

Envoi de l'heure à distance par fil ou T. S. F.

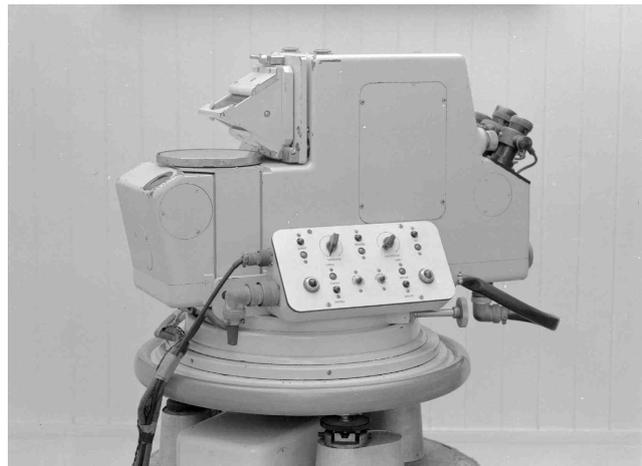


Instrument de mesure astronomique du Temps universel



Cercle méridien de Bouty (installé en 1922)

On note, l'instant du passage (en Temps sidéral) au méridien local, d'étoiles de positions connues.



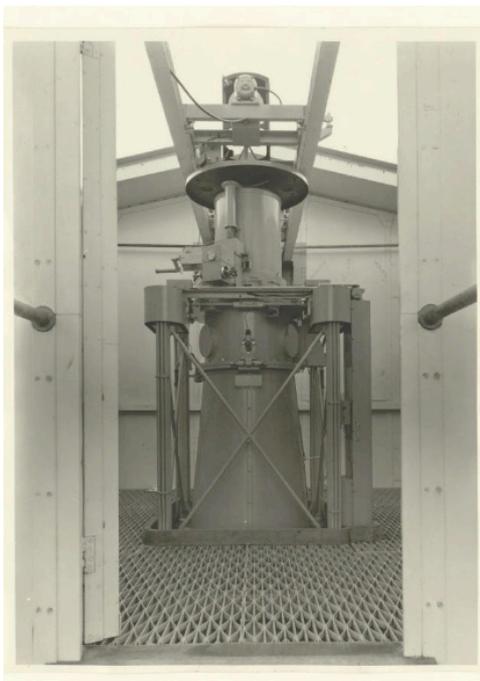
Astrolabe de Danjon (~ 1955)

Mesure de l'instant de passage (en Temps sidéral) par le cercle de hauteur 60° d'étoiles de positions connues.

Dans les deux cas: emploi d'horloges de précision, de dispositifs « impersonnels » et de chronographes permettant d'enregistrer sur une bande de papier, l'instant de ce passage à une fraction de seconde près.

Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Photographic Zenith Tube (PZT)

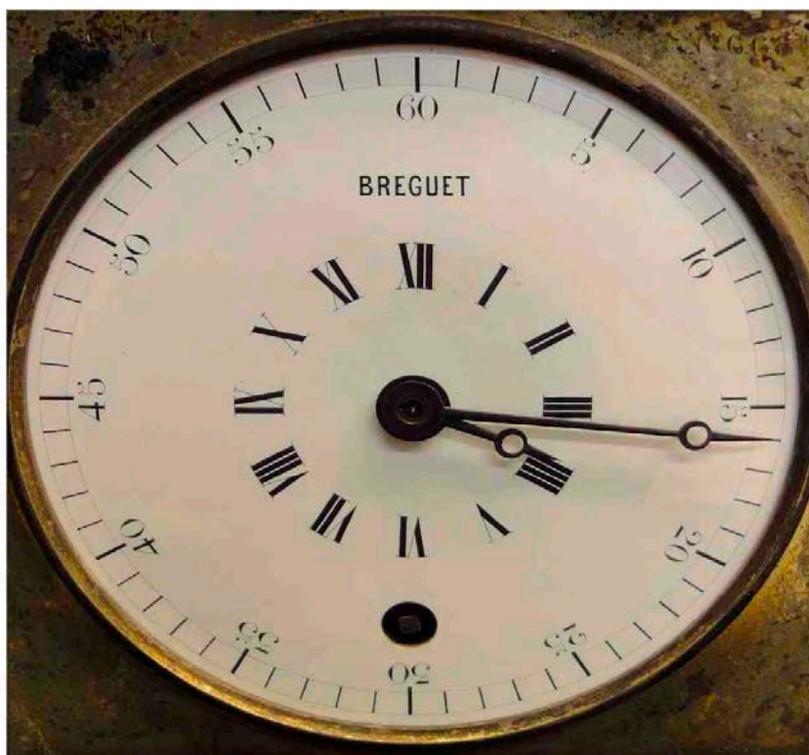


Royal Greenwich Observatory, 1957 - 1984



USNO, 1957 - 1984

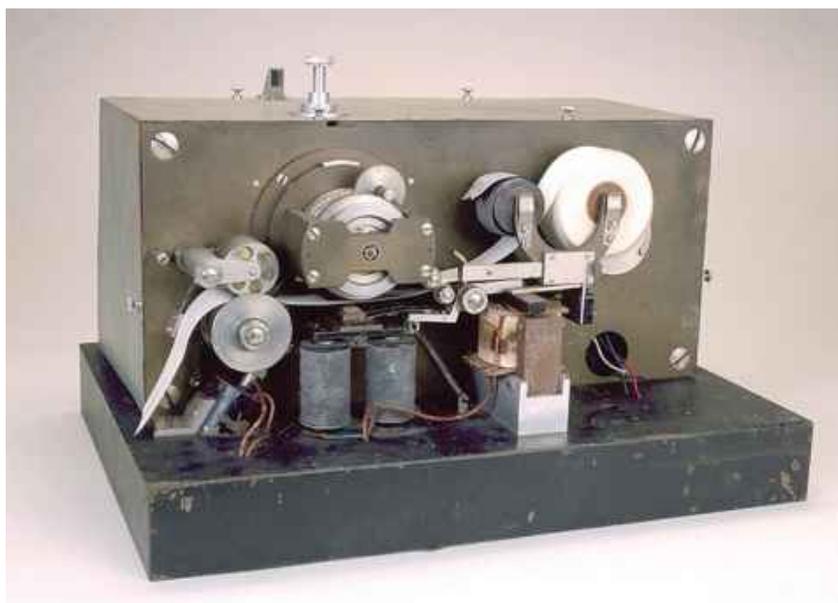
Observations photographiques. Mesure de l'instant de passage (en Temps sidéral) au zénith du lieu d'étoiles de positions connues.



© Bibliothèque de l'Observatoire de Paris - Alidade (Accès en Ligne aux Instruments, Documents et Archives De l'astronomiE) – 6 Octobre 2017

Horloge directrice, 19e siècle, Observatoire de Paris – Louis Bréguet

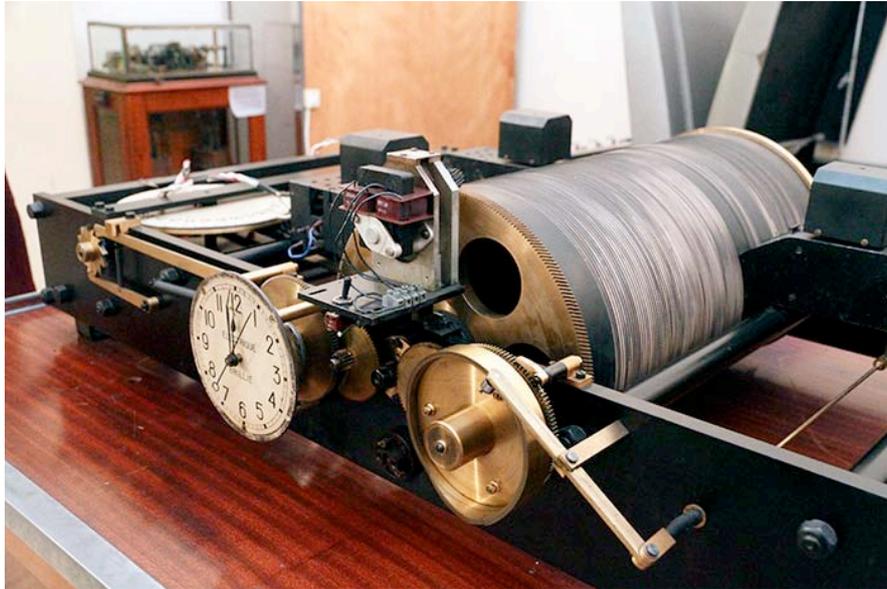
Bibliothèque de l'Observatoire de Paris



Chronographe de l'observatoire de Besançon.
Paris 1906, P. Gautier

© Inventaire général, ADAGP, 2004

Première horloge parlante (E. Esclangon, 1933)



Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

La seconde atomique a 50 ans - Paris, 13 octobre 2017

27

Horloge à quartz



À partir de 1930



© Bibliothèque de l'Observatoire de Paris - Alidade (Accès en Ligne aux Instruments, Documents et Archives De l'Astronomie) — 6 Octobre 2017

Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

La seconde atomique a 50 ans - Paris, 13 octobre 2017

28

Composition du service horaire d'un grand observatoire (1949)

- **Instruments astronomiques** servant à la détermination astronomique du temps: lunette méridienne, lunette zénithale, astrolabe de Danjon, lunette photographique zénithale, etc.
Efforts pour améliorer la précision par l'usage de la photographie ou de micromètres « impersonnels » (à fil mobile maintenu par l'observateur en coïncidence avec l'image de l'étoile traversant le champ de la lunette) → réduction effet de bissection et de réfraction:
0.01 s pour une soirée d'observation (1950) → 0.001 s.
- **Chronographe électrique**, interposé entre la lunette et la pendule: enregistre l'instant du contact; chronographe imprimant Gautier-Prin: précision de 0.01 s; chronographe à plume (défilement rapide): 0.001 s.
- **Pendule fondamentale** servant à « conserver » l'heure entre les déterminations astronomiques successives; pendules de haute précision: horloges à balancier, puis horloges à quartz.
- **Organes de diffusion** commandées par la pendule fondamentale: pendules synchronisés, cadrans récepteurs, horloge parlante (1^{ère} à Paris en 1933: 12 à 15 millions d'appels/an), émetteurs de signaux radio-électriques.



© Bibliothèque de l'Observatoire de Paris - Alidade (Accès en Ligne aux Instruments, Documents et Archives De l'astronomiE) — 6 Octobre 2017

Source: Observatoire de Paris

Le Bureau international de l'heure (BIH)

- D'abord uniquement consacré à l'heure, le BIH publie son 1er rapport annuel en 1920. [UT était mis à la disposition par des Bulletins horaires](#), bimestriels, donnant les temps d'émission de nombreux signaux horaires radio.
- En 1929, le BIH commence à publier « [l'heure définitive](#) » des émissions de signaux horaires, fondée sur une moyenne de toutes les mesures par divers instruments astrométriques observant les étoiles (75 instruments vers 1970).
- Le [BIH a ensuite étendu ses activités à la détermination du mouvement du pôle](#) de rotation et la réalisation du repère terrestre de référence. L'imprécision de lecture ultime du [Temps universel UT1 \(corrigé du mouvement du pôle\)](#) était jusqu'en 1965 d'environ 1 à 2 millisecondes (ms). Le délai de publication des bulletins était de l'ordre de l'année.
- Le [Temps universel UT2 \(corrigé de la variation annuelle\)](#) est utilisé pour les émissions et les rapports à partir de 1956. La distinction entre UT0, UT1 et UT2 a été précisée, et l'utilisation de UT2 est prescrite par l'Assemblée générale de l'UAI, d'août 1956 à Dublin.
- En 1964, le BIH introduit le temps atomique et les signaux horaires sont alors émis en [Temps universel coordonné UTC](#) (créé en 1958); généré à partir du temps atomique, il ne peut différer que de 5 ms de UT2, contrainte qui impose des décalages en fréquence et des sauts à l'échelle du temps atomique (abandon de cette contrainte en fréquence en 1972).
- L'usage d'horloges atomiques dans les observatoires et les progrès des communications réduisent ce délai à 2 mois. Mais [la précision de la mesure de UT par l'astrométrie classique](#), le plus souvent visuelle, portant sur les étoiles ne s'est que peu améliorée : [cette technique avait atteint ses limites](#) à cause, en particulier, de la réfraction et de la turbulence de l'atmosphère.

Evolution des travaux du BIH

- Pendant la plus grande partie de son existence, le BIH s'est occupé du [Temps Universel lié à la rotation terrestre](#).
- La mise en service, au [Royaume-Uni](#), du [premier étalon atomique de temps à césium](#) ouvre un nouveau champ d'activité au BIH. Les premières échelles de temps atomique, construites au BIH et dans quelques laboratoires, servent d'abord à étudier la rotation terrestre et à coordonner l'émission des signaux horaires.
- En 1965, le BIH prend l'initiative de lier le temps d'émission des signaux horaires à sa propre échelle de temps atomique, jetant ainsi les bases du système du [Temps Universel Coordonné](#) (UTC).
- L'utilisation d'un certain nombre de stations indépendantes a permis de préciser les termes périodiques et de caractériser les phénomènes d'origine locale.
- [En 1967, des solutions globales ont été mises au point par le BIH](#) et appliquées aux mesures de latitude ou/et de Temps universel [par environ 80 instruments](#).
- Ce traitement global donnait simultanément les coordonnées du pôle et UT1, avec respectivement une précision de à 0.01" et 0.001 s ; la conservation du pôle de référence était réalisé par une méthode statistique. En 1975, le SIMP a également mis au point une solution globale.

1920-1924 : Rapports Annuels

1920-1924 : Corrections des signaux horaires déterminées au Bureau International de l'Heure

1922-1941 : Bulletin Horaire, tomes I à VII donnant

- l'heure demi-définitive,
- l'heure définitive,
- les rapports annuels,
- diverses informations, en particulier les décisions d'organismes internationaux relatives à l'heure.

1941-1964 : Bulletin Horaire, séries 1 à 6 donnant

- l'heure demi-définitive,
- les rapports annuels,
- les coordonnées du pôle,
- des informations diverses.

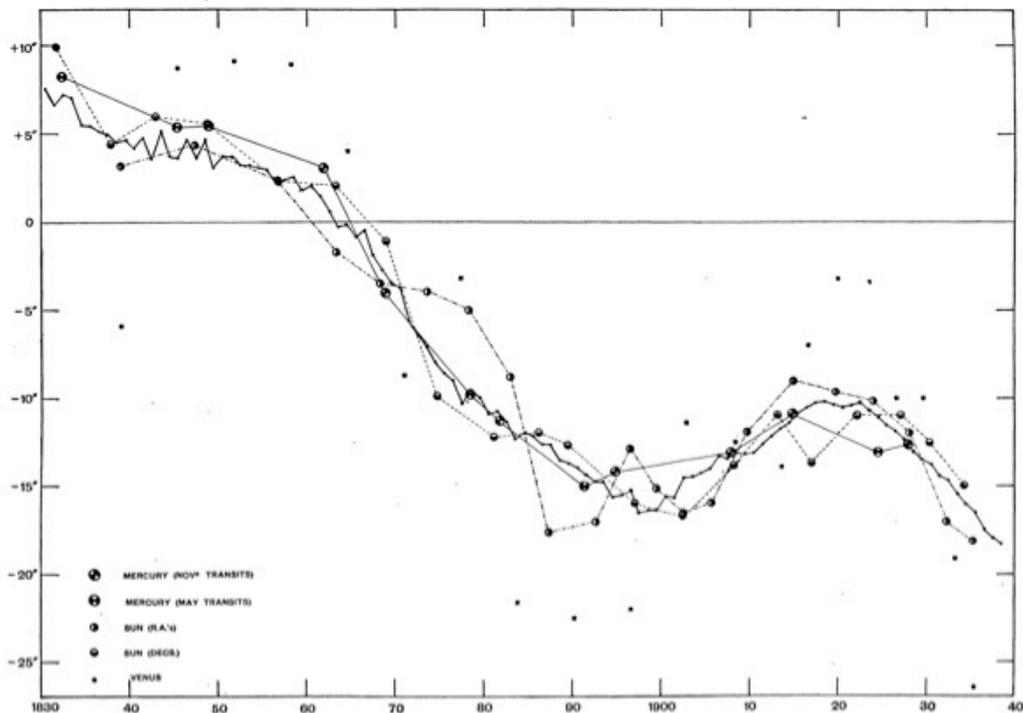
1940-1964 : Bulletin Horaire, séries D, E, F, G, H, donnant

- l'heure définitive et sa méthode de calcul,
- le temps atomique intégré.

1^{er} rapport BIH sur
temps atomique
BH G, n°8 en 1960.

Evolution du statut du temps basé sur la rotation terrestre

- Antiquité-17^e siècle: **Postulat de reproductibilité** de la durée moyenne du jour.
- 18^e-20^e siècle: **Postulat d'uniformité de la rotation terrestre** (Euler 1737): temps solaire moyen prend le statut de **temps de la dynamique newtonienne**.
- Jusqu'à la fin du 19^e siècle: Le Temps solaire moyen, puis le Temps universel, fut l'unique échelle de temps de précision. Il n'y eut aucun procédé pour vérifier son uniformité. **Il était considéré comme étant de durée invariable**.
- 1899: le **mouvement du pôle** est découvert et mesuré. UT est corrigé de l'effet de ce mouvement sur les mesures de latitude et TU → **Temps universel UT1**
- 1927: Le **ralentissement séculaire et les variations décennales de la rotation de la Terre** sont mises en évidence par l'étude des mouvements orbitaux de la Lune et des planètes (Newcomb 1926, de Sitter 1927, Spencer Jones 1939).
- 1935: on reconnaît les inégalités de rotation de la Terre, mais il n'y a pas de modèle mathématique → **variations de durée de la seconde** (de temps moyen).
- 1937: Découverte des **variations saisonnières de la rotation de la Terre** (Stoyko, 1937) par référence à des horloges artificielles (pendules, horloges à quartz).
- 1955: Correction empirique appliquée à UT1 pour éliminer la variation annuelle (**définition du Temps Universel UT2**).
- 1956: Distinction précise entre UT0, UT1 et UT2. L'utilisation de UT2 est prescrite (AG 1956). **UT2 est utilisé pour les émissions et les rapports du BIH.**



Fluctuations de la longitude moyenne de la Lune (1835-1936) déduites des observations du Soleil et des planètes Mercure et Vénus, multipliées par les coefficients correspondants (Spencer Jones, 1939).

Le bon accord entre les fluctuations provenant des différentes observations prouvent le non-uniformité de TU

La seconde atomique a 50 ans - Paris, 13 octobre 2017

35

Perspectives pour l'astronomie après l'apparition de la 1ère horloge atomique (Danjon 1949)

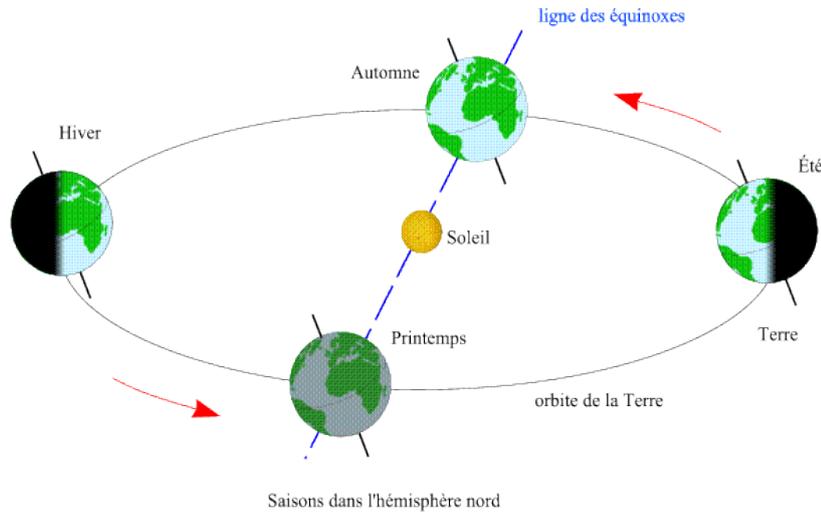
Malheureusement, ces machines, si perfectionnées soient-elles, seront toujours sujettes à s'arrêter. Elles seront reproductibles à volonté, et l'on disposera ainsi de véritables étalons naturels de temps; mais il sera toujours difficile d'assurer la continuité de l'échelle de temps proprement dite, c'est-à-dire de l'échelle à laquelle sont rapportées, non les durées, mais les dates. Il est certain que les phénomènes astronomiques offrent seuls la pérennité nécessaire pour assurer la continuité d'une telle échelle.

On peut supposer qu'à l'avenir la conservation du temps sera assurée à l'aide d'appareils fournis par les physiciens aux astronomes, ceux-ci les utilisant pour l'étude des mouvements célestes et la détermination des écarts entre les mouvements observés et les mouvements déduits de la théorie. En revanche, si quelque catastrophe mondiale venait à détruire simultanément tous les garde-temps, nécessitant la mise en service de nouveaux appareils dont la comparaison aux anciens serait impossible, les mouvements célestes assureraient la remise à l'heure précise des horloges de remplacement.

Ces perspectives, où l'astronomie se voit dépossédée du monopole des opérations relatives à la détermination du temps, ne sont pas faites cependant pour déplaire à un astronome. Si nous avions le moyen d'étudier les mouvements célestes en les rapportant, non plus à l'un d'entre eux, la rotation de la terre, qui nous est devenu suspect, mais à une échelle de temps physique, il est très probable que des faits qui nous ont échappé seraient bientôt mis en évidence. De nouvelles découvertes viendraient s'ajouter à celle des fluctuations de la rotation de la terre pour renouveler la mécanique céleste et lui donner un regain d'intérêt. L'astronomie fondamentale n'y perdrait rien, au contraire.

36

Mesure du temps par le mouvement apparent du Soleil au cours de l'année



Année tropique: durée de révolution de la Terre autour du Soleil rapportée à l'équinoxe $\sim 365.242\ 190$ jours

Année sidérale: durée de révolution de la Terre autour du Soleil rapportée à un équinoxe fixe $\sim 365.256\ 363$ jours

Différence relative de durée entre année tropique et année sidérale: 5×10^{-5}

Echelle de temps dynamique

- Réalisation d'une échelle de temps uniforme

Si l'état d'une « horloge » H peut être décrit de façon rigoureuse et complète en fonction du paramètre t , temps uniforme de la mécanique, alors: $H = f(t) \Leftrightarrow t = f^{-1}(H)$.

La détermination de $t_1 = f^{-1}(H_1)$, $t_2 = f^{-1}(H_2)$, ..., $t_n = f^{-1}(H_n)$, ... permet de réaliser une **échelle de temps uniforme**.

Si le principe fondamental de la dynamique est valable, toutes les horloges de la forme $H^i = f^i(t)$ donnent la même valeur de t au même instant (\pm erreurs d'observation).

- Concept d'une échelle de temps dynamique

Une échelle de temps dynamique peut être définie par la description, en fonction du temps, du mouvement orbital des planètes dans le système solaire sous l'influence des forces de gravitation agissant sur ces planètes.

- Concept et réalisation du **Temps des éphémérides**

Concept: Description rigoureuse du mouvement orbital par l'intégration des équations de la dynamique \rightarrow **échelle de temps « uniforme gravitationnel »**

Réalisation: Le mouvement orbital des planètes s'observe par les déplacements angulaires (L) sur la sphère céleste

- (1) Mesure de la longitude moyenne du Soleil: \odot à l'instant θ , lu sur un horloge,
- (2) En utilisant l'expression $\odot = f(t)$, on calcule $t = f^{-1}(\odot)$, d'où $t - \theta$, c.-à-d. $TE - \theta$;
- (3) Si l'horloge de référence est en TU, on obtient: $TE - UT$, noté ΔT .

Etapes d'adoption du Temps des éphémérides (TE)

- 1929: Reconnaissance par Danjon que, du fait des fluctuations de la rotation de la Terre, le Temps solaire moyen ne satisfaisait pas le besoin d'uniformité d'une échelle de temps. Il suggère l'utilisation de l'échelle de temps basée sur les lois des mouvements planétaires.
- 1948: Clemence propose la réalisation du Temps des éphémérides par le facteur ΔT dérivé des mesures de Spencer Jones (1939). Il détermine la correction à la théorie de la Lune qui rend sa variable indépendante équivalente à celle de la longitude moyenne du Soleil par les tables de Newcomb (1926).
- 1948: Proposition du CIPM à l'UAI d'établir une échelle de temps fondamentale plus uniforme que TU.
- 1950: Cette proposition est considérée par la « Conférence sur les constantes fondamentales astronomiques », à Paris, qui recommande d'utiliser la mesure du temps donnée par les tables du Soleil de Newcomb avec comme unité l'année sidérale 1900.0.
- 1952: Adoption par la 8ème AG de l'UAI d'une résolution recommandant d'adopter cette mesure du temps, en utilisant comme unité l'année sidérale à 1900.0, et de l'appeler « Temps des éphémérides ». Les mérites relatifs de l'année sidérale et de l'année tropique ne sont pas discutés. Des considérations ultérieures ont amené à changer pour l'année tropique de 1900.0, plus facile à mesurer et moins dépendante de la valeur des constantes astronomiques.
- 1956: Le Comité international pour les poids et mesures (CIPM) définit la seconde de ET comme « la fraction $1/31\,556\,925.974\,7$ de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures TE ».
- 1958, la définition de l'UAI précise que: « Le Temps des éphémérides (TE) est compté dès l'instant, près du début de l'année civile 1900, lorsque la longitude moyenne géométrique du Soleil était de $279^\circ 41' 48.04''$, moment où la mesure du TE était 1900 Janvier 0 d 12 h précisément. »
- 1960: Cette définition est ratifiée par la Conférence générale sur les poids et les mesures (CGPM).

La seconde atomique a 50 ans - Pis, 13 octobre 2017

39

Colloque international sur les constantes fondamentales de l'astronomie et mesure du temps (Observatoire de Paris, 27 mars - 1 avril 1950)

6° La Conférence recommande que, dans tous les cas où l'on juge que la seconde de temps solaire moyen ne constitue pas une unité de temps satisfaisante en raison de sa variabilité, l'année sidérale pour 1900,0 soit adoptée comme unité de temps, que le temps mesuré à l'aide de cette unité soit désigné sous le nom de *Temps des Éphémérides*; que la conversion du temps solaire moyen en Temps des Éphémérides soit obtenue par la correction suivante :

$$\Delta t = + 24^s,349 + 72^s,3165 T + 29^s,949 T^2 + 1,821 B,$$

où T est compté en siècles juliens à partir de 1900 Janvier 0 à midi moyen de Greenwich, B ayant la signification donnée plus haut, et que la même formule définisse également la seconde correspondant au Temps des Éphémérides.

Aucun changement n'est apporté à la définition ni au mode de détermination du « Temps Universel ».

Caractéristiques du Temps des éphémérides (TE)

- Le Temps des éphémérides (TE) est une **forme du temps de la dynamique classique**. Son expression ne tient pas compte des effets relativistes
- L'échelle de temps TE est basée sur la **période de la révolution de la Terre autour du Soleil**.
- L'**unité et l'origine du TE sont conventionnellement définies** par l'adoption d'une expression numérique de la longitude moyenne géométrique(*) du Soleil basée sur les tables du Soleil de Newcomb (1895):

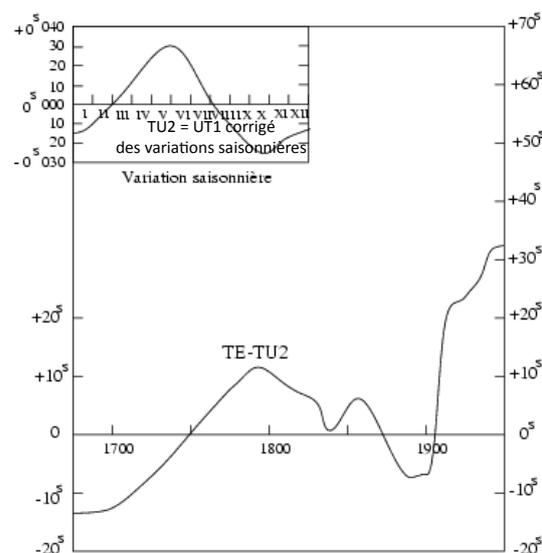
$$L_m = 279^{\circ}41'48.04'' + 129\,602\,768.13'' T + 1.08\,9'' T^2, \quad (1)$$

où T est le temps compté en siècles juliens de 36 525 jours des éphémérides depuis 1900 janvier 0, 12h ET.

- Bien que définie à l'aide de l'expression de Newcomb, comme solution de l'équation (1), l'ET a été réalisé en utilisant les **observations de la direction de la Lune** dans le système de référence céleste.
- Les **éphémérides astronomiques ont adopté l'ET** comme variable indépendante.
- L'**année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 TE est une année fictive** qui correspond à la vitesse de L_m à la date indiquée.
- Selon la formule de Newcomb, **l'année tropique de 1900 contient 31 556 925.9747 s de TE**.

(*): position apparente corrigée de l'effet d'aberration (dû au temps mis par la lumière pour nous parvenir).

Différences TE – TU2 de 1680 à 1955 (Danjon 1959)



TE - TU2 = 32.184 s au 01/01/1958

Détermination du TE

- La détermination de ET par les observations du Soleil étaient **peu pratiques et peu précises**.
- ET a donc été déterminé en utilisant des **observations de la direction de la Lune**, après étalonnage de ces observations avec celles de la longitude du Soleil.
- Ces observations ont été utilisées conjointement avec diverses éphémérides lunaires conventionnelles pour calculer les estimations de l'ET → ensemble de réalisations « secondaires » de ET, dénotées ET0, ET1 et ET2.
- Le mouvement de la Lune était mesuré en observant des occultations d'étoiles par la Lune, ou bien par photographie. Importantes campagnes d'observations vers 1955.
- La méthode la plus précise a été celle des photographies de la Lune sur fond d'étoiles obtenues avec **la caméra lunaire de Markowitz** à double entrainement réalisée à l'USNO.
- Cela a permis de déterminer ET à partir du mouvement orbital de la Lune pendant plusieurs années, les observations étant rapportée à une échelle UT2 déterminée à partir d'observations PZT faites à ce même observatoire.
- Bien que les éphémérides astronomiques adoptent ET comme variable indépendante, il **était difficile d'obtenir des estimations précises en temps réel de l'ET**.

Instrument de mesure du Temps des éphémérides

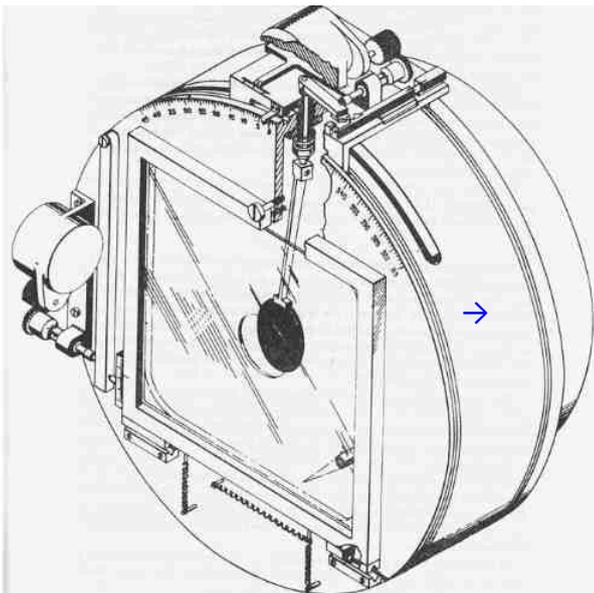


Figure 16.1 Schematic view of the dual-rate camera built by William Markowitz. (Courtesy of U.S. Naval Observatory Library, Washington, D.C.)

Caméra à double entrainement de Markowitz pour la mesure (USNO) du Temps des éphémérides

La caméra de Markowitz est un instrument astronomique pour **observations photographiques de position de la Lune par rapport aux étoiles**.

Propriétés: L'instrument se place sur une lunette. Le petit filtre **absorbe la lumière de la Lune**, égalisant ainsi le temps d'exposition pour la Lune et les étoiles.

Une plaque parallèle plane **compense le déplacement de l'image de la Lune par rapport aux étoiles**. On observe ainsi des images claires de la Lune sur fond d'étoiles.

La position de la Lune est obtenue avec une précision de 0.1 s → **série temporelle de positions de la Lune à des instants précis en UT2**.

Conséquences de l'adoption du Temps des éphémérides

- Le TE a eu deux rôles importants:
 - Il a permis l'étude des fluctuations de vitesse de rotation de la Terre depuis 1700 environ jusqu'à l'adoption du temps atomique.
 - Il a donné, en 1960, la base d'une nouvelle définition de la seconde du SI, dite *seconde des éphémérides*, exprimée comme une fraction de l'année tropique pour le début de 1900, selon l'expression de Newcomb.
- Conséquence sur la durée de la seconde
 - Comme Newcomb a utilisé principalement des observations faites au cours du 18^e et 19^e siècles, rapportées au temps solaire moyen, la « seconde des éphémérides » a une durée approximativement égale à celle de la moyenne de la seconde de temps moyen à cette période.
 - Elle est plus courte que la seconde de UT1 actuelle d'environ $1 \text{ à } 2 \times 10^{-8} \text{ s}$.
- Dissémination du TE
 - Il n'était pas possible d'obtenir des estimations précises en temps réel de l'ET.
 - Le TE n'a ainsi jamais été disséminé directement. Il était accessible par des tables de corrections à UT1, publiées avec un retard de plusieurs années et une précision sur sa lecture de l'ordre du dixième de seconde.
 - Fondé sur la loi de la gravitation de Newton, il érige cette loi en dogme et n'offre aucun moyen la vérifier.

Inconvénients du TE

- Le principal inconvénient de TE résidait dans le fait qu'il faille attendre au moins un an pour que l'imprécision des mesures ne soit pas excessive (de l'ordre de 0,1 s).
- Il était donc déterminé, à court terme, avec une précision nettement moins bonne que UT. Par contre, il offrait l'avantage d'une très bonne stabilité à long terme : de l'ordre de quelques 10^{-9} (soit 1 seconde en 10 ans).
- En fait, son utilisation a été limitée aux seuls besoins astronomiques et n'a jamais été employée dans la vie courante.
- De plus, dans les brèves années où TE était l'échelle de temps officielle (et même avant), les progrès technologiques accomplis dans la conception et la réalisation d'horloges atomiques laissait prévoir un avenir limité à cette échelle de temps. En effet, en 1967, l'exactitude des horloges atomiques atteignait 10^{-12} .

CIPM, 1956 : Résolution 1

Définition de l'unité de temps (seconde)

En vertu des pouvoirs que lui a conférés la Dixième Conférence générale des poids et mesures par sa Résolution 5, le Comité international des poids et mesures,

considérant

1. que la Neuvième Assemblée générale de l'Union astronomique internationale (Dublin, 1955) a émis un avis favorable au rattachement de la seconde à l'année tropique,

2. que, selon les décisions de la Huitième Assemblée générale de l'Union astronomique internationale (Rome, 1952), la seconde de temps des éphémérides (T.E.) est la fraction $(12\,960\,276\,813/408\,986\,496) \cdot 10^{-9}$ de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 h T.E.,

décide : 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.

Résolution 9 de la 11^e CGPM (1960)

Définition de l'unité de temps (seconde)

La Onzième Conférence générale des poids et mesures,

Considérant

- le pouvoir donné par la Dixième Conférence générale des poids et mesures au Comité international des poids et mesures de prendre une décision au sujet de la définition de l'unité fondamentale de temps,
- la décision prise par le Comité international des poids et mesures dans sa session de 1956,

ratifie la définition suivante :

« 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. »

Echelles de temps astronomiques fondamentales

Echelle de temps	Phénomène physique	Irrégularité	Incertitude lecture	Définition s	Usage pour dynamique céleste
Temps Universel	Rotation de la Terre	10^{-7}	5.10^{-5} s	-> 1960 1/86400 j.s.m.	jusqu'à 1950
Temps des Ephémérides	Mouvement orbital de la Terre	10^{-9}	0.1 s	1960-1967 1/31 556 925.9747 année tropique pour 1900 janv 0, 12 h ET	jusqu'en 1970

La seconde du TE

- En 1956, le CIPM a adopté la **seconde des éphémérides** comme unité de temps, décision ratifiée en 1960 par la CGPM.
- La **seconde des éphémérides** a été l'unité de temps du SI de **1960 à 1967**.
- Contrairement à la logique, cette définition a été basée sur une **fréquence plus faible que la définition précédente** (année au lieu du jour), exigeant une moyenne de plusieurs années pour obtenir la précision requise.
- L'échelle du « Temps des éphémérides » associée à cette unité était difficile à réaliser et, par conséquent, a eu une courte durée de vie. TE a été utilisé uniquement pour des applications astronomiques et le temps de la rotation de la Terre, TU, a continué à être utilisé comme échelle de temps pratique.
- Dans les années 1950, Louis Essen et Jack Parry au National Physical Laboratory (NPL, Royaume-Uni) ont réalisé le **premier étalon atomique de fréquence à jet de césium** et ont démontré qu'il pourrait être 200 fois meilleur que le temps astronomique. L'ère du temps atomique était née.
- William Markowitz à l'USNO a alors entrepris un vaste programme mondial pour **exprimer la fréquence du césium en termes de la seconde des éphémérides**.
- Cette valeur a été adoptée par la Résolution 1 de la 13^e CGPM (1967) pour la définition actuelle de l'unité de temps du SI, la seconde atomique.

Raccordement entre la seconde de TE et la seconde atomique

- Collaboration entre:
 - Physiciens du NPL (UK) : L. Essen et J.V.L. Parry,
[Utilisation de l'étalon à Cs du NPL en horloge](#)
(Essen & Parry 1955: détermination de la fréquence du Cs exprimée en UT2 à ± 2 Hz),
 - Astronomes de l'USNO: W.M. Markowitz et R.G. Hall,
[Détermination astronomique régulière à l'USNO](#) de UT avec 2 PZT et ET avec caméra Markowitz
- Utilisation de deux horloges à quartz:
 - [Horloge à quartz du NPL](#): ajustée sur la fréquence du Cs,
 - [Horloge à quartz de l'USNO](#): réglée par UT2.
- . Détermination des différences de temps entre USNO et NPL par signaux radio
Série temporelle de différences \rightarrow Détermination de la différence de fréquence entre Cs et UT2 (Essen et al. 1958)
- . Comparaison entre fréquence de UT2 et fréquence du TE (USNO)
Série temporelle de différences \rightarrow fréquence du Cs en terme de seconde des éphémérides (Markowitz et al. 1958)
- Valeur obtenue: $\nu_{Cs} = (9\,192\,631\,770 \pm 20)$ cycles par seconde de TE,
[l'incertitude étant presque entièrement due aux incertitudes du Temps des éphémérides.](#)

ANNEXE 1

Lettre du Président du Comité International des Poids et Mesures au Président de l'Union Astronomique Internationale

13 novembre 1967

Monsieur le Président,

Je vous prie de trouver ci-joint la Résolution 1 qui vient d'être adoptée par la 13e Conférence Générale des Poids et Mesures, le 13 octobre 1967, et qui change la définition de l'unité de temps du Système International d'Unités.

Vous constaterez que la Conférence Générale, dans cette Résolution, n'a pas abrogé la seconde des éphémérides; elle a seulement abrogé sa Résolution antérieure (et celle du Comité International) afin d'éviter que le Système International d'Unités ait deux unités de temps.

Il va sans dire que le Comité International des Poids et Mesures, qui est l'auteur du projet de cette Résolution 1, n'a pas et n'a jamais eu l'intention de gêner les travaux des astronomes, qui sont évidemment nécessaires et doivent continuer. Il a jugé inutile d'introduire dans la Résolution que la seconde des éphémérides fait partie intégrante du système des constantes astronomiques de l'U.A.I. Bien au contraire, en s'abstenant de le faire, le Comité International a eu le souci de ne pas s'immiscer dans les décisions de l'U.A.I. et de ne pas gêner des révisions éventuelles futures.

Depuis l'antiquité, l'unité de temps avait été définie par des phénomènes astronomiques, c'est pourquoi la Conférence Générale des Poids et Mesures s'est trouvée amenée à introduire des notions astronomiques dans ses résolutions. Désormais, en ces matières, et sauf besoin nouveau, la Conférence Générale entend laisser la liberté d'action aux organismes compétents, et qui font autorité, tels que l'union Astronomique Internationale.

Veuillez agréer,

Signé: L.E. HOWLETT, Président