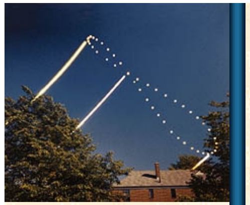
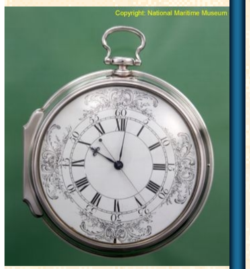


Ecole de Géodésie Spatiale

2- 6 Septembre 2002

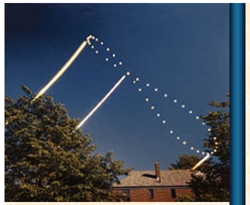
Forcalquier



Échelles de Temps

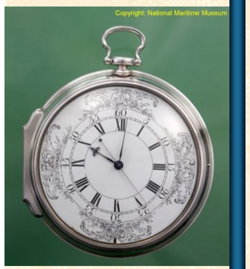
F. Mignard

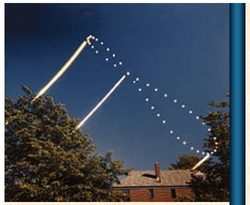
OCA/CERGA

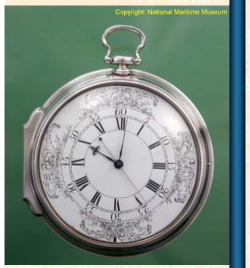


Plan

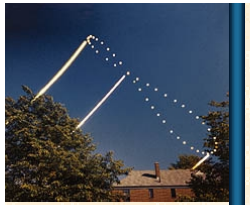
- Concepts et principes
- Temps et astronomie
- Échelles relativistes
- Comptes longs
- Petits problèmes amusants







Concepts et principes



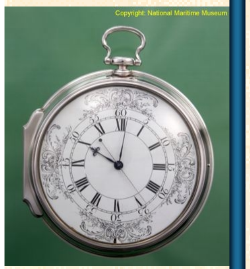
Concepts de la mesure du temps I.

- Qu'est ce que le temps ?????
  - Pas de bonnes réponses….
  - …mais sans inconvénients pour les travaux scientifiques.
- Sens inné de la durée , du passé et du futur
  - Valable pour les temps macroscopiques

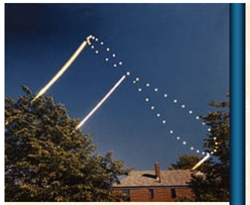
$$t \gg t_p = \left[\frac{G\hbar}{c^5}\right]^{1/2} \approx 10^{-43}\, s$$

$$t \ll t_H = 1/H_0 \approx 10^{10}\,\mathrm{yrs}$$

- Appréciation subjective de la notion d'égalité des durées
  - pas de congruence de temps
  - un intervalle n'est pas transportable



- Construction d'échelles empiriques pour marquer l'écoulement du temps
  - clepsydre, gnomon, sablier, bougie, mvt des astres ➔ phénomènes évolutifs continus
  - rotation de la terre, pouls, oscillations ➔ phénomènes "périodiques"

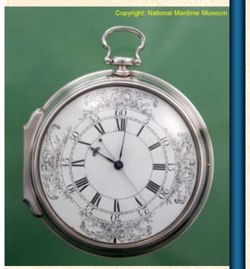


Concepts de la mesure du temps II.

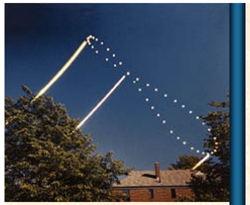
Hypothèse

Reproduction à l'identique des phénomènes physiques soumis aux mêmes causes

- Recherche de phénomènes physiques dont on puisse *contrôler* la reproductibilité
- Pas de sens absolu à la notion d'uniformité : aucune échelle n'est plus uniforme qu'une autre
  - dire que la Terre ne tourne pas uniformément est imprécis
  - les échelles de temps ne peuvent s'apprécier que relativement entre elles.



- Deux étapes majeures dans la construction des échelles :
  - Définition du paramètre entrant dans les modèles mathématiques
    - * une masse + ressort n'a pas ***absolument*** un mouvement sinusoïdal
  - Réalisation expérimentale de cette échelle idéale



Temps de la physique

- Introduction du temps newtonien t
  - Échelle de temps qui rend la description des phénomènes simples
  - **F** = m **γ** **(dans une référentiel spatial approprié)**
  - temps absolu, unique, découplé de l'espace, mesurable
  - lois de la chute des corps, des écoulements, des vibrations, des mouvements planétaires

- L'uniformité d'une échelle s'apprécie en regard de cet idéal

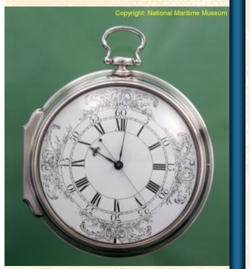
Rotation de la Terre :

$$\alpha = \omega T \quad \longrightarrow \quad \text{temps terrestre}$$

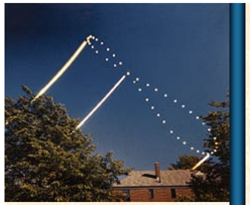
$$\alpha = \omega t + \dot{\omega}\, t^2 / 2 \quad \longrightarrow \quad \text{temps newtonien}$$

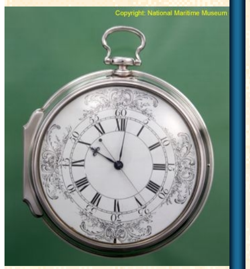
- Introduction des échelles relativistes t
  - Échelle de temps qui rend la description des phénomènes simples

$$ds^2 = \left(-1 + \frac{2U(t,\mathbf{r})}{c^2}\right) c^2 dt^2 + \delta_{ij}\left(1 + \frac{2U(t,\mathbf{r})}{c^2}\right) dx^i dx^j$$

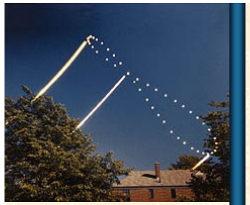


  - t : temps coordonnée, repérable
  - lois de la chute des corps, des écoulements, des vibrations, des mouvements planétaires
  - réalisation à partir de phénomène physiques
  - Le temps mesurable est le temps propre local





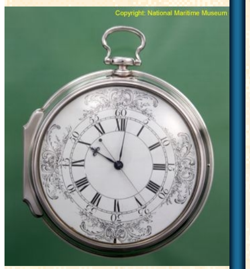
Temps et Astronomie



Temps Solaire (1)

- Échelle basée sur la rotation de la Terre et le mouvement du Soleil
- Échelle la plus naturelle dérivée du mouvement diurne
- Accessible par les cadrans solaires

- Temps solaire vrai = angle horaire du Soleil = H_s
  - $H_s = a\,T$
- Temps solaire moyen = angle horaire du Soleil moyen = H_m
  - $H_m = bT$ par définition
  - Unité : $\Delta H_m = 2\pi \Rightarrow \Delta T = 86400$ s.
  - C'est une tentative pour réaliser le temps newtonien t, **soit $T = t$**

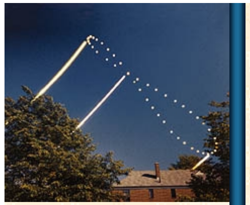


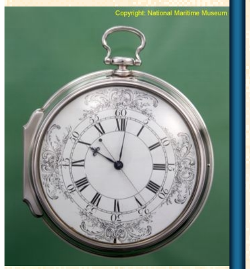
$$H_s = \alpha_z - \alpha_s$$ ← Angle horaire du Soleil

$$\alpha_z = \omega t$$ ← Rotation de la Terre

$$\alpha_s = \varpi + \underbrace{M + 2e\sin M}_{\text{ellipse}} - \underbrace{\tan^2\frac{\varepsilon}{2}\sin 2(\varpi + M)}_{\text{écliptique/équateur}} + O(e^2, \varepsilon^4)$$

$$M = nt \quad n = 0.9856..°/\mathrm{j}$$ ← Mouvement moyen du Soleil





Temps solaire (2)

$$\alpha_s = \langle \alpha_s \rangle + E = \alpha_0 + nt + E$$

$$H_s = (\omega - n)t - E = H_m - E$$

- E : Équation des temps
  - midi vrai : passage du soleil au méridien
  - 12h : passage du soleil moyen au méridien
- E > 0 : Soleil vrai en avance ➔ passage après 12 h
- E < 0 : Soleil vrai en retard ➔ passage avant 12 h

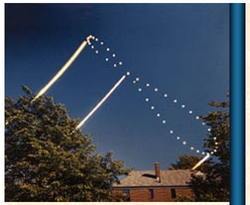
$$E = 1.92\sin(M) - 2.46\sin(204 + 2M) \quad \text{(deg)}$$

$$= 7.7\sin(M) - 9.8\sin(204 + 2M) \quad \text{(mn)}$$

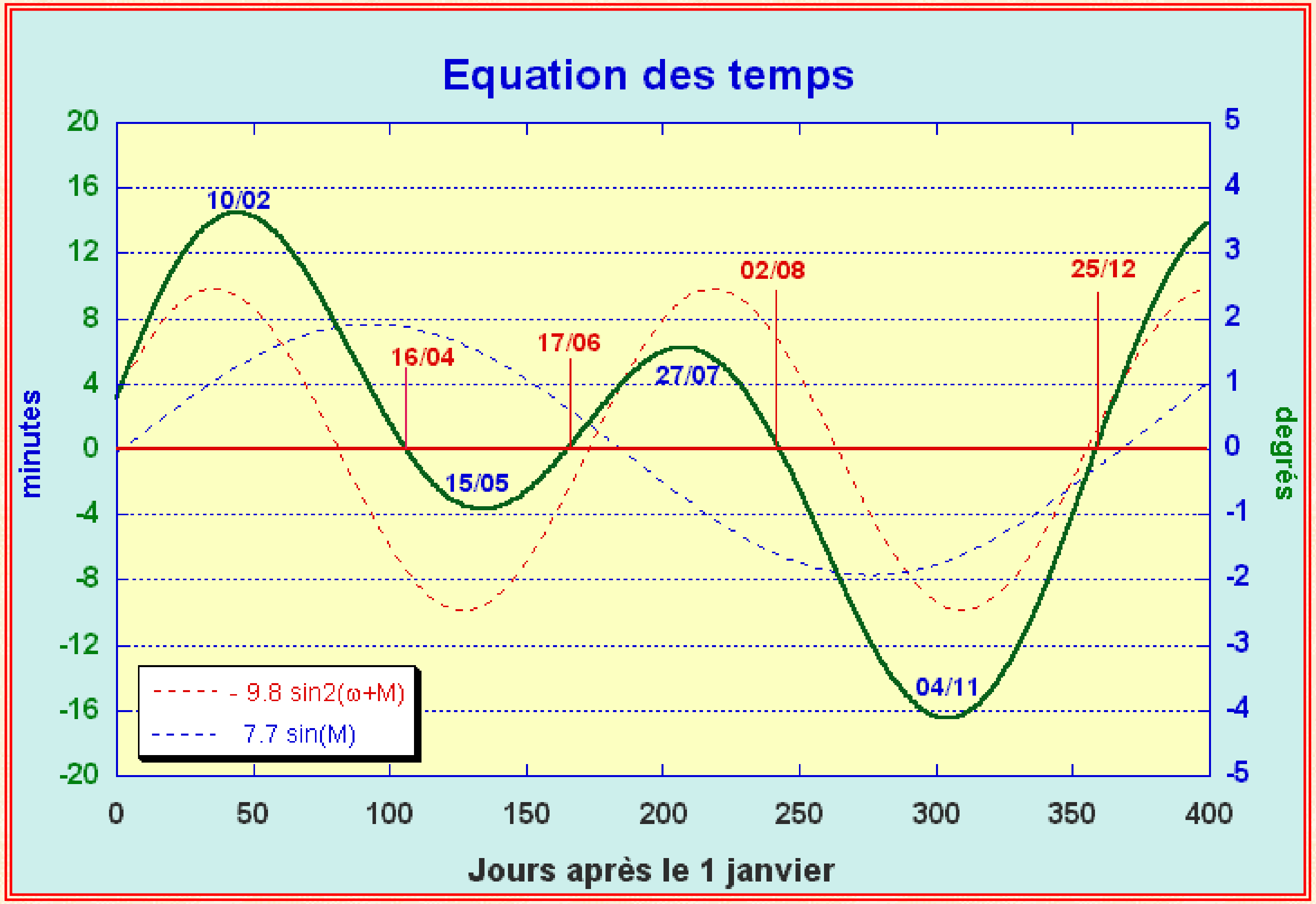
$$\frac{2\pi}{\omega - n} = 1\,j = 86400s \ \text{(de temps solaire moyen)}$$

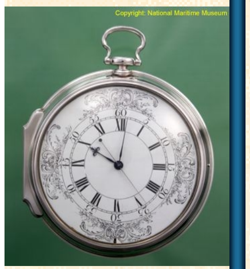
$$\frac{2\pi}{\text{n}} = 365.2422\,j \ \text{(1 année tropique)}$$

$$\longrightarrow \quad \boxed{\frac{2\pi}{\omega} = 86164.1\ s}$$



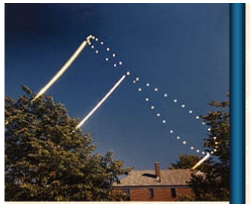
L'Équation des temps

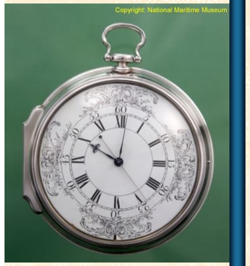




- Très lentement variable avec les mouvements de l'écliptique et du point γ

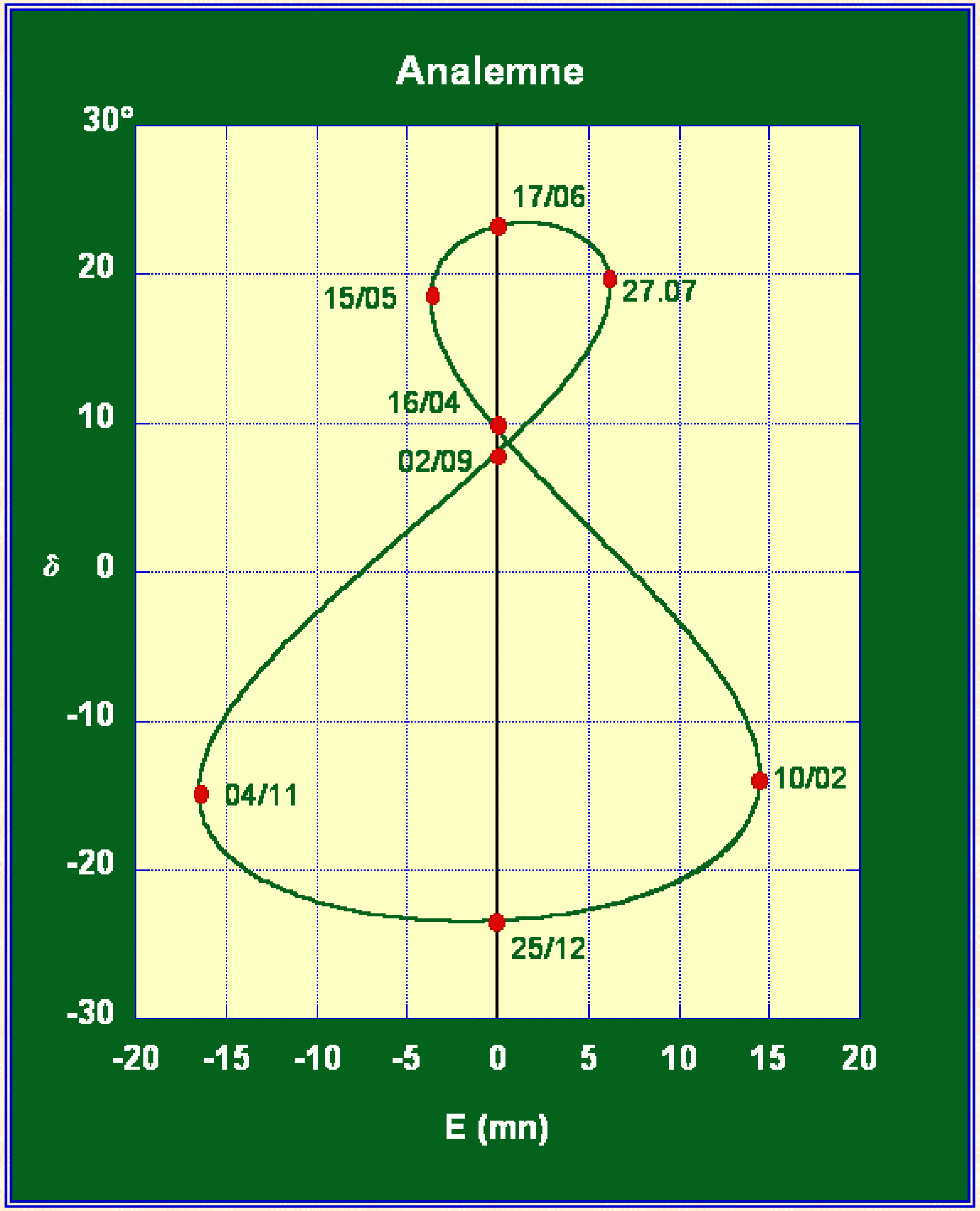
Méridienne de temps moyen

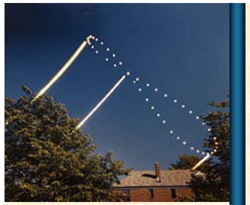




- Lecture directe du temps moyen sur un cadran solaire.

- Le méridien est remplacée par une courbe en boucle



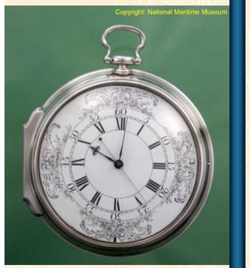


Temps Universel

- ~ Temps solaire moyen de Greenwich … sans référence au Soleil + 12h
- Ascension droite de Greenwich :
  - $\alpha_G = a\,t$ ➔ rotation uniforme de la Terre par rapport aux étoiles si $t = t_{newton}$
  - la constante est choisie pour que 1 jour solaire moyen = 86400 s
  - $2\pi/a = 86164.1$ s

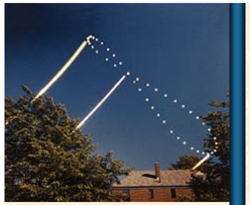
- Définition précise :
  - TSMG (en s) à 0h UT1 avec origine au point γ (origine mobile) :

$$24110.54841 + 8640184.812866\,T_U + 0.093104\,T_U^2 - 6.2\times10^{-6}\,T_U^3$$



  - Angle stellaire du GEO à 0h UT1 avec l'origine non-tournante (CEO) :

$$24110.54841 + 8639877.31738\,T_U$$



Temps Atomique

- Seconde SI : Définition donnée par la 13 CGPM en 1967

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation de la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental du Cs 133.

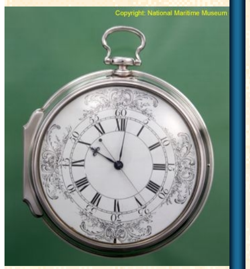
- Réalisation par des étalons au Césium dans différents laboratoires
    - exactitude : 2 x10^{-14} pour les étalons classiques, 10^{-15} pour les fontaines au sol

- Temps atomique : 14 CGPM en 1971 :

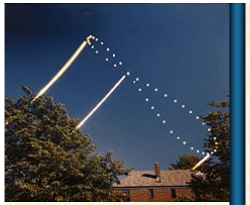
Le TAI est la coordonnée de repérage temporel établie par le BIH sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant conformément à la définition de la seconde.

- Précision de 1980 :

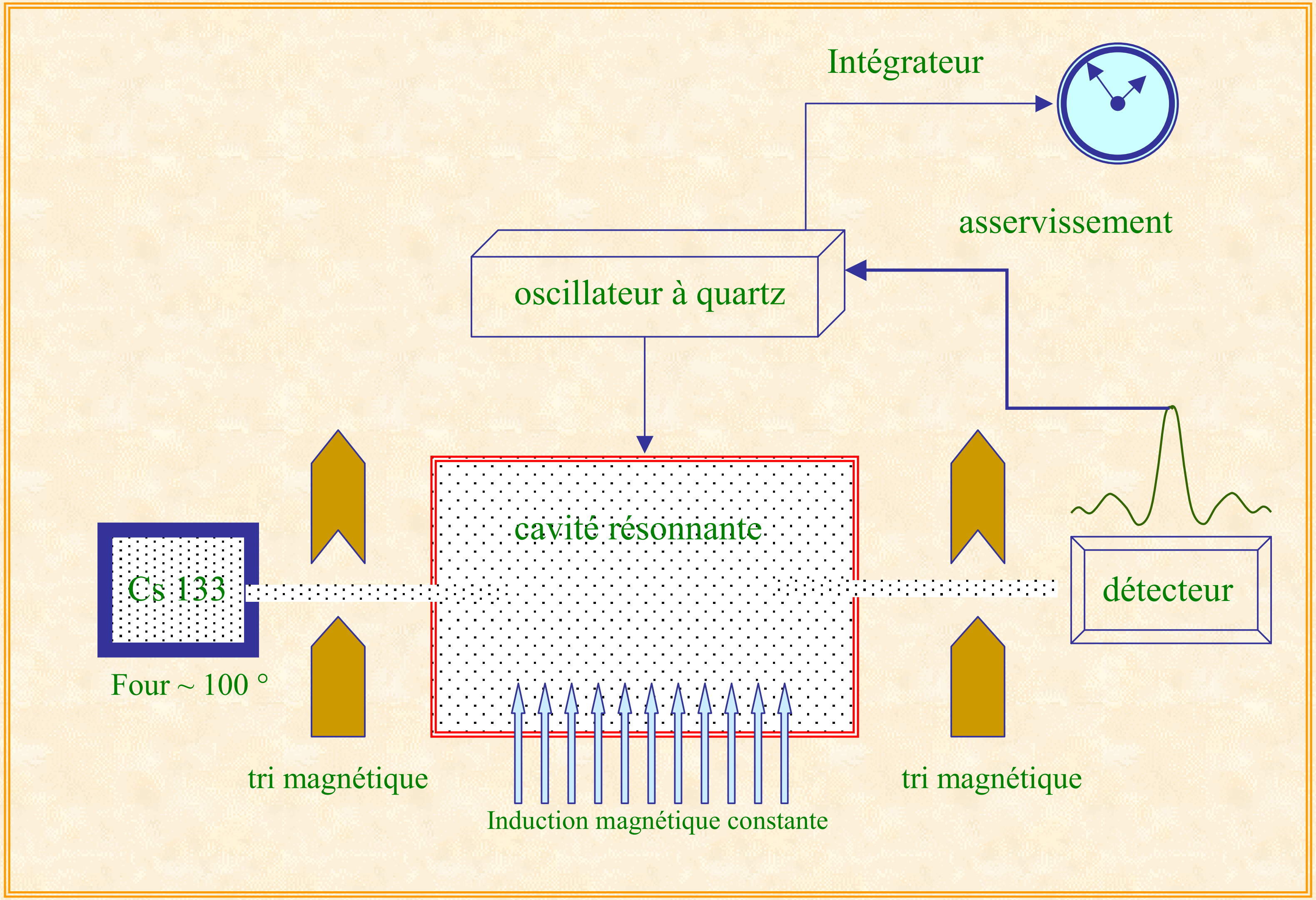
Le TAI est une échelle de temps-coordonnée définie dans un repère géocentrique avec comme unité d'échelle la seconde SI, telle qu'elle est réalisée sur le géoïde en rotation.

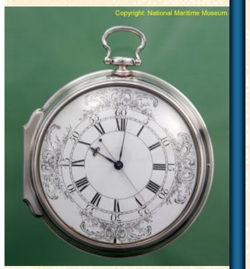


- Réalisation à partir de ~ 200 horloges dans 50 laboratoires. Algorithmes complexes pour :
    - prendre en compte les différentes qualités d'horloges
    - éviter les perturbations en cas d'arrêt de certaines horloges
    - assurer la stabilité de l'unité de l'échelle sur une longue durée
    - assurer un service permanent en temps réel

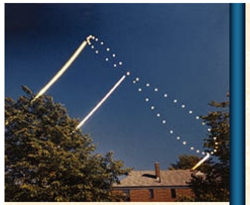


Horloge à Césium



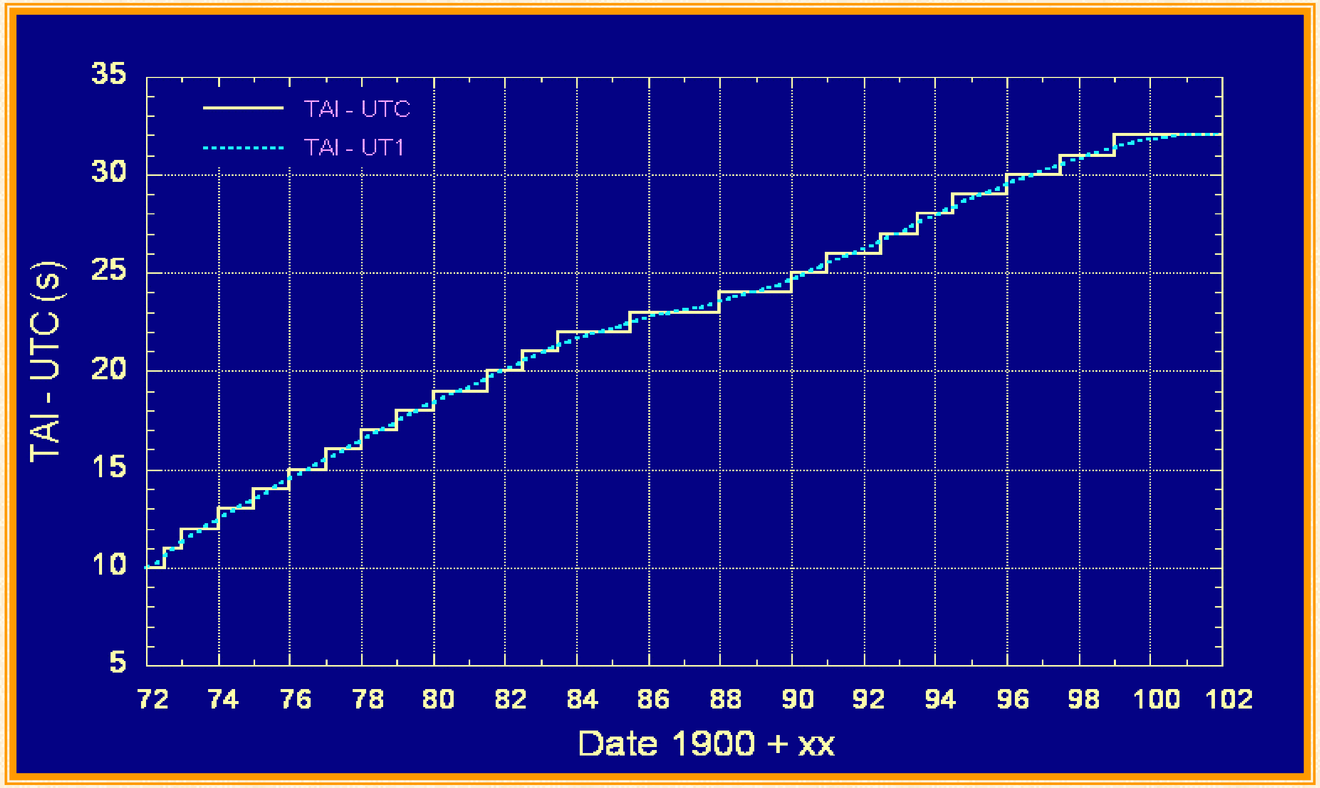


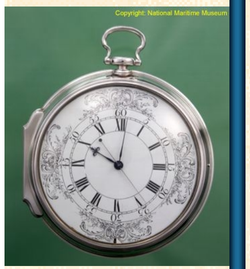
Etalon à Césium = Horloge à quartz pilotée sur la transition du césium

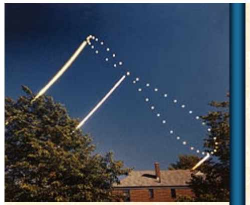


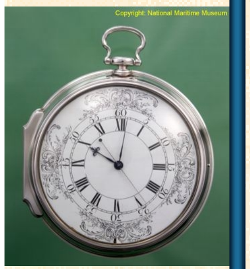
Temps Universel Coordonné (UTC)

- Échelle de compromis entre le TAI et le TU
  - qualité du TAI par morceaux
  - proche du Temps Universel en moyenne
  - ajustement par saut discret de 1 s lorsque |UTC- UT1| > 0.9 s
  - abandon probable du système dans quelques années

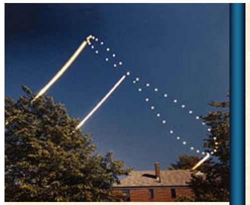








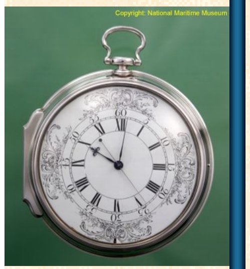
Échelles Relativistes

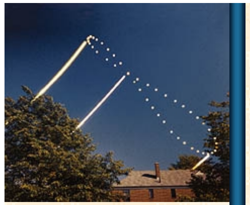


Quelques principes

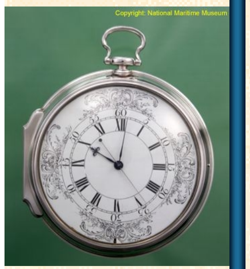
- Abandon du temps absolu, unique valable partout et pour tous
- Éclatement de *t* en deux notions différentes :
  - le temps local mesurable : TEMPS PROPRE
  - le paramètre de repérage, le *t* des équations : TEMPS-COORDONNÉE

- Relations théoriques entre les temps-coordonnées
- Relations théoriques avec le temps propre
- Métrologie du temps en relativité
  - définition et réalisation des temps locaux des observateurs
  - unité de temps comme unité de temps propre, invariante, indépendante des coordonnées
  - modèles théoriques de l'astronomie, géodésie en fonction des temps-coordonnées
  - traitement des observables (quantités propres) avec les modèles (grandeurs-coordonnées)





Échelles de temps relativistes - I



- Système UAI 1991, complété en 2000

BCRS et TCB

origine : Barycentre du système solaire

orientation : ICRS

$$ds^2 = g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta$$

$$g_{00} = -1 + \frac{2U(t,\mathbf{x})}{c^2} + O(c^{-4}) \quad ; \quad g_{0i} = O(c^{-3}) \quad ; \quad g_{ij} = \delta_{ij}\left(1 + \frac{2U(t,\mathbf{x})}{c^2}\right) + O(c^{-4})$$

U : potentiel gravitationnel des masses du système solaire

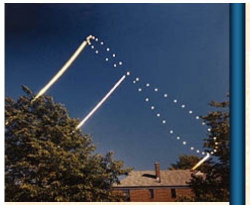
t : Temps coordonnée barycentrique : TCB

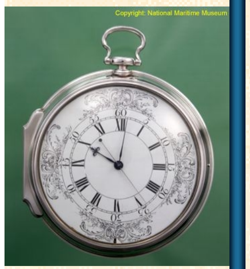
$$d\tau^2 = -\frac{ds^2}{c^2} = \left[1 - \frac{2U}{c^2}\right] dt^2 - \left[1 + \frac{2U}{c^2}\right] dl^2 / c^2$$

Valeur de t à l'origine :

Au 1 Jan $0^h\, 0^m\, 0^s$ TAI (JD : 2443144.5 TAI) ➔

t = 1 Jan $0^h\, 0^m\, 32.^s184$ (JD 2443144.5003725 TCB)





Échelles de temps relativistes - II

GCRS et TCG

origine : Géocentre

orientation : ICRS

$$ds^2 = G_{\alpha\beta} dX^\alpha dX^\beta$$

$$G_{00} = -1 + \frac{2W(T,\mathbf{X})}{c^2} + O(c^{-4}) \quad ; \quad G_{0i} = O(c^{-3}) \; ; \quad G_{ij} = \delta_{ij}\left(1 + \frac{2W(T,\mathbf{X})}{c^2}\right) + O(c^{-4})$$

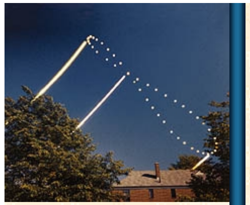
W : $W_E + W_T$

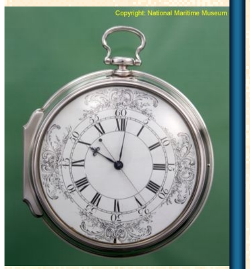
W_E = potentiel gravitationnel de la Terre

W_T = potentiel de marée des autres corps du SS par rapport au géocentre.

T : Temps coordonnée géocentrique : TCG

$$d\tau^2 = -\frac{ds^2}{c^2} = \left[1 - \frac{2W}{c^2}\right] dT^2 - \left[1 + \frac{2W}{c^2}\right] dL^2 / c^2$$





Relation entre TCB et TCG - I

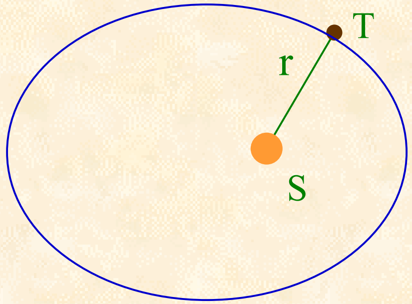
- Une seule échelle suffit, les autres étant liées par des expressions
- Formulation simplifiée avec 2 corps

$$d\tau^2 = -\frac{ds^2}{c^2} = \left[1 - \frac{2U}{c^2}\right]dt^2 - \left[1 + \frac{2U}{c^2}\right]dl^2 / c^2$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \left(\left[1 - \frac{2U}{c^2}\right] - \left[1 + \frac{2U}{c^2}\right]\frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2} \approx 1 - \frac{v^2}{2c^2} - \frac{U}{c^2}$$

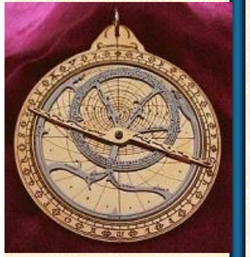
$$\boxed{\tau = t - \int\left(\frac{v^2}{2c^2} + \frac{U}{c^2}\right)dt}$$

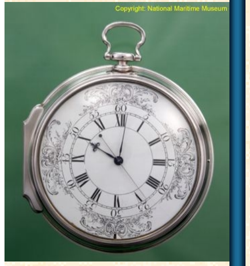
Mouvement elliptique keplerien :



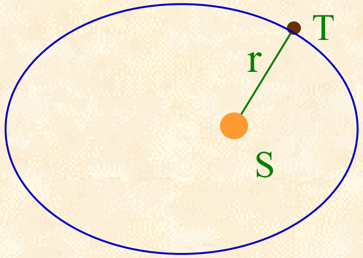
$$U = \frac{GM_s}{r} \quad ; \quad \frac{v^2}{2} - \frac{Gm_s}{r} = -\frac{GM}{2a} \quad ; \quad \frac{v^2}{2c^2} + \frac{U}{c^2} = \frac{GM_s}{c^2 a}\left(\frac{2a}{r} - \frac{1}{2}\right)$$

$$\frac{a}{r} = 1 + e\cos M + e^2\cos 2M + \cdots$$





Relation entre TCB et TCG - II

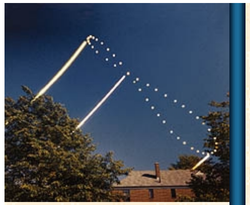


$$\frac{v^2}{2c^2}+\frac{U}{c^2}=\frac{GM_s}{c^2 a}\left(\frac{2a}{r}-\frac{1}{2}\right)=\frac{GM_s}{c^2 a}\left(\frac{3}{2}+2e\cos M+2e^2\cos 2M\right)+\mathrm{O}(e^3)$$

$$\boxed{\tau=t-\frac{GM_s}{c^2 a}\int\left(\frac{3}{2}+2e\cos M\right)dt=t\left(1-\frac{3}{2}\frac{GM_s}{c^2 a}\right)-\frac{2e}{n}\frac{GM_s}{c^2 a}\sin M-\frac{e^2}{n}\frac{GM_s}{c^2 a}\sin 2M+\mathrm{O}(e^3)}$$

- Décalage en fréquence : $\frac{3}{2}\frac{GM_s}{c^2 a}\approx 1.49\mathrm{x}10^{-8}$

- Termes périodiques : $\frac{2e}{n}\frac{GM_s}{c^2 a}\approx 1.65\,\mathrm{ms}$ $\qquad \frac{e^2}{n}\frac{GM_s}{c^2 a}\approx 14\mu s$



Relation entre TCB et TCG - III

Formulation IAU 91 :

$$TCB - TCG = \frac{1}{c^2}\left[\int_{t_0}^{t}\left(\frac{v_E^2}{2} + U_{ext}(t, \mathbf{x}_E)\right)dt + v_E^i r_E^i\right] + O(c^{-4})$$

= Différence de lecture d'horloges pour un évènement unique de l'espace-temps.

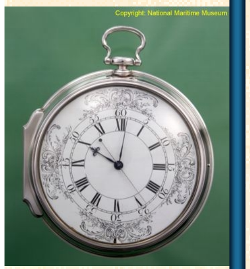
v_E = vitesse du géocentre

U_{ext} = potentiel des masses (sauf la Terre) au géocentre

$r_E^i = x^i - x_E^i(t)$

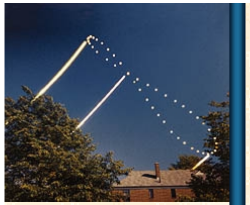
Partie périodique

$$t - T \ (\mu s) = 1656.7 \ \sin(\lambda_3) + 22.4 \sin(\lambda_3 - \lambda_5) + 13.8 \sin(2\lambda_3) +$$
$$4.8 \sin(2\lambda_5) + 4.7 \sin(\lambda_3 - \lambda_6) + 2.3 \sin(\lambda_6) + \ldots$$



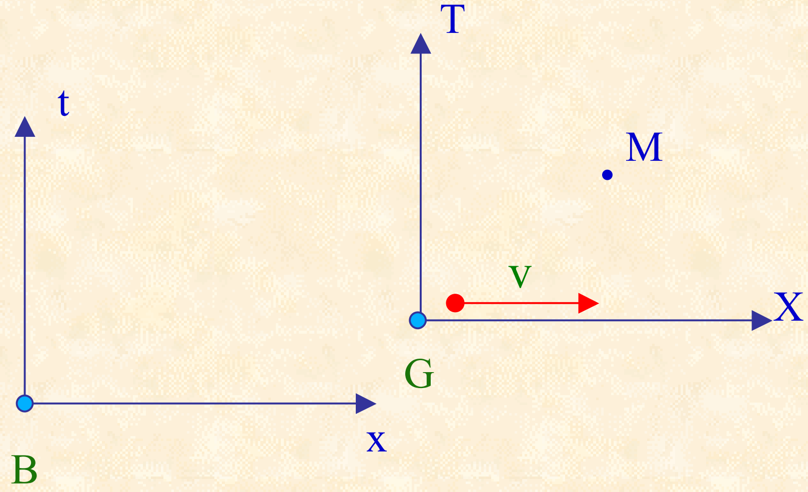
Expression complète à partir d'intégrations analytiques ou numériques : :

10 termes	> 1.0	µs
30 "	> 0.1	µs
100 "	> 0.01	µs
200 "	> 1	ns
500 "	> 0.1	ns



Comparaison avec la relativité restreinte

- Deux référentiels en mouvement relatif uniforme

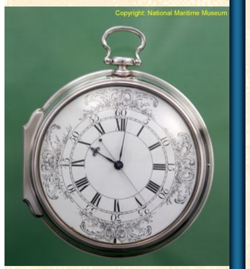


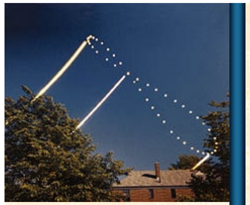
$$X = \gamma(x - vt) \qquad T = \gamma(t - vx/c^2) \qquad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x = \gamma(X + vT) \qquad t = \gamma(T + vX/c^2)$$

$$\boxed{t \approx T\left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) + \frac{vX}{c^2} \approx T + \int_0^t \frac{v^2}{2c^2} dt \ + \frac{vX}{c^2}}$$

$$TCB - TCG = \frac{1}{c^2}\left[\int_{t_0}^{t}\left(\frac{v_E^2}{2} + U_{ext}(t, \mathbf{x}_E)\right)dt + v_E^i r_E^i\right] + O(c^{-4})$$





Relation entre TCB et TCG - IV

Partie séculaire

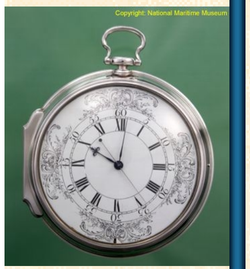
- Sur une durée suffisamment longue

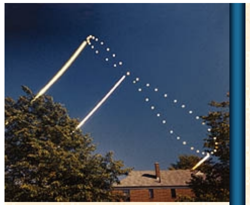
$$< \mathrm{TCG/TCB} > = 1 - \mathrm{L_c} = 1.48082686741\mathrm{x}10^{-8} \pm 2\mathrm{x}10^{-17} \sim \frac{3}{2}\frac{\mathrm{GM_s}}{c^2 a}$$

$$\boxed{TCB - TCG = L_c \times (JD - 2443144.5) \times 86400 + v^i r_E^i / c^2 + P}$$

- Il n'y a pas de définition non ambiguë de $\mathrm{L_c}$, car la valeur dépend de l'éphéméride, du temps d'intégration et du processus utilisé pour évaluer la moyenne.

- Les définitions ont été précisées et étendues en 2000, pour une exactitude de 0.2 ps ou 10^{-17} en taux.



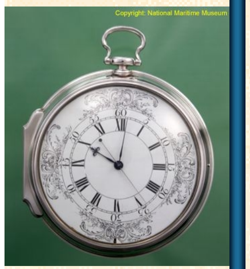


Temps Terrestre (TT) - I

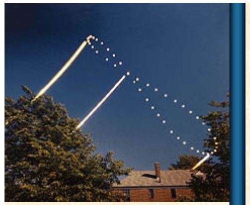
- "Philosophie"
  - On souhaite une échelle idéale dont la réalisation serait le TAI
  - Son unité d'échelle doit être la seconde SI sur le géoïde
  - Il fallait également assurer la continuité avec le TE

$$\boxed{TT = TE = TAI + 32.184 \text{ s}}$$

- Devenu entre 1976 et 1991 le TDT : *Temps Dynamique Terrestre*
  - très mauvaise terminologie
  - ce n'est pas un temps dynamique
  - ce n'est pas un temps propre au géocentre



- C'est un temps proche du temps propre sur le géoïde qu'il faut relier au TCG



Temps Terrestre (TT) - II

- Temps propre sur le géoïde

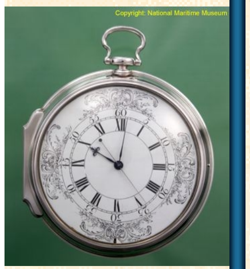
  - Métrique du GCRF : $$d\tau^2 = -\frac{ds^2}{c^2} = \left[1 - \frac{2W}{c^2}\right] dT^2 - \left[1 + \frac{2W}{c^2}\right] dL^2 / c^2$$

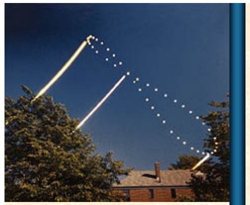
  - pour une horloge à la surface de la Terre (non-tournante)

$$d\tau = \left(1 - \frac{2W}{c^2}\right)^{1/2} dT \approx \left(1 - \frac{W}{c^2}\right) dT = (1 - L_G) dT$$

$$L_G \approx \frac{W}{c^2} \approx \frac{GM_E}{Rc^2} \approx \left(\frac{7.9}{3 \times 10^5}\right)^2 \approx 7.0 \times 10^{-10}$$

- Entre le TCG (T) et le temps propre à la surface de la Terre il n'y a qu'une différence de marche





Temps Terrestre (TT) - III

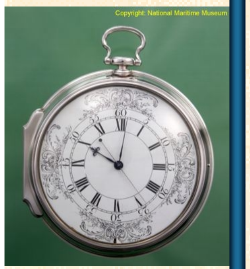
- On prend en compte le géoïde tournant et on définit : $L_G = \dfrac{W_0}{c^2}$

$$W_0 = 62\,636\,855.4 \pm 0.5 \text{ m}^2 s^{-2}$$ ➔ incertitude de 10^{-17} sur L_G

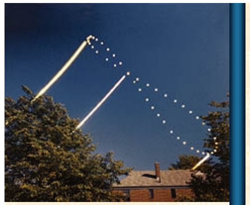
- On propage les incertitudes du géoïde sur le TT

- Le facteur d'échelle est soumis aux révisions du géoïde

- IAU 2000 :
  - L_G devient une constante de définition : $L_G = 6.969\,290\,134 \times 10^{-10}$
  - dTT/dTCG = 1 - L_G



$$\boxed{TCG - TT = L_G \times (JD - 2443144.5) \times 86400}$$



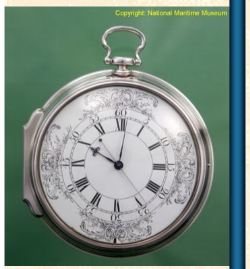
Temps Dynamique Barycentrique (TDB)

- C'est une relique d'une échelle qui est la fois barycentrique (proche du TCB) mais sans marche par rapport au TAI.
- C'est l'échelle de temps employée (en principe) dans les éphémérides du système solaire

$$TCG - TT = L_G\,\Delta \qquad \Delta = (JD - 2443144.5)$$

$$TCB - TCG = L_C\,\Delta + vx/c^2 + P$$

$$TT \approx TAI$$

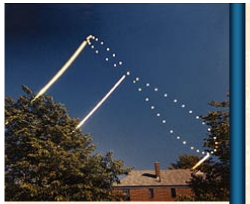


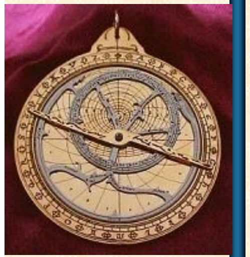
- On définit alors : $\boxed{TCB - TDB = (L_C + L_G)\Delta = L_B\,\Delta}$

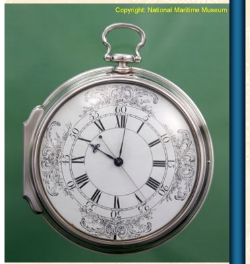
$$L_B = 1.55051976772\times10^{-8} \pm 2\times10^{-17}$$

- En gros TDB = TCB corrigé du potentiel solaire au niveau de la Terre et du potentiel terrestre à sa surface. Unité d'échelle = 1s SI.

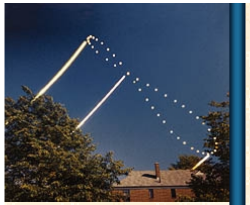
Synthèse

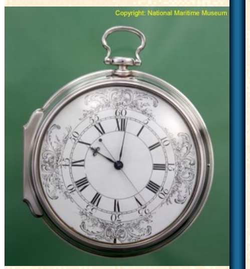




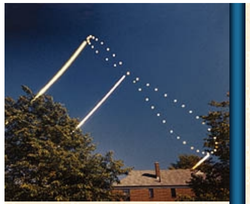


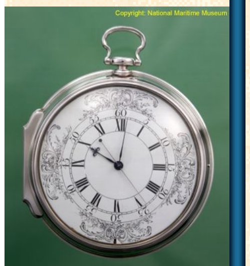
Barycentre	Géocentre/Géoïde
TCB	TCG : TCB-TCG = $L_C \, \Delta + vr/c^2 + P$
TDB : TCB-TDB = $L_B \, \Delta$	TT : TCG – TT = $L_G \, \Delta$
~~TE~~	~~TDT~~
	TAI : réalisation du TT
	TT(TAI) = TAI +32.184 s
	UTC : TAI – UTC = k (32s depuis 01/01/99)
	GPS : TAI – GPS = 19s
	TU : |UTC- UT1| < 0.9 s





Les Comptes longs



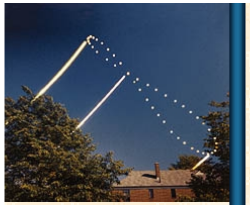


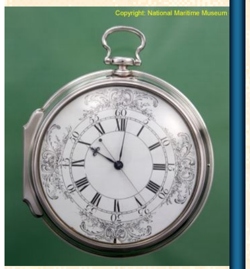
Comptes longs

- Principe : dénombrement continu des jours
  - choix de l'origine
  - préciser la notion de " jour"
  - notation des dates
- Solution adoptée en astronomie : Période julienne et jours juliens
  - rien à voir avec le calendrier julien
  - période inventé en par Joseph Scaliger ~ 1580
  - système de décompte des jours introduit par J. Herschel en 1849
- Période basée sur la combinaison de trois cycles calendaires
  - S : le cycle solaire de 28 ans (période du calendrier Julien)
  - M : le cycle de Méton de 19 ans (19 années ~ 235 mois lunaire - 0.08 j)
  - I : l'indiction romaine de 15 ans (cycle fiscal introduit par Constantin en 312)
  - Une année est caractérisée par le triplet (S, M, I)

S	M	I

S = [0..27]
M = [0..18]
I = [0..14]





Calcul de la période et de l'origine

- Période : 28 x 19 x 15 = 7980 ans
- Origine : année où le compteur indique | 0 | 0 | 0 |
- En 2002 S = 22, M = 7, I = 9.
  - Depuis le début il s'est écoulée N années avec :

$$\begin{cases} N \equiv 22 \quad (28) \\ N \equiv 7 \quad (19) \\ N \equiv 9 \quad (15) \end{cases}$$

Systèmes de congruences linéaires = théorème du reste chinois

$$x \equiv a_i \quad (m_i) \qquad i = 1 \cdots k$$

on pose $M = m_1 m_2 \ldots m_k \qquad n_i = M / m_i$

solution : $x = \sum a_i b_i n_i \quad (M)$ avec b_i solution de $b_i n_i \equiv 1 \quad (m_i)$

Application :

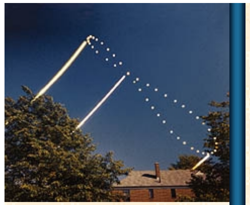
$$m_1 = 28 \quad a_1 = 22 \quad n_1 = 285 \quad b_1 = 17$$

$$m_2 = 19 \quad a_2 = 7 \quad n_2 = 420 \quad b_2 = 10$$

$$m_3 = 15 \quad a_3 = 9 \quad n_3 = 532 \quad b_3 = 13$$

$$M = 7980$$

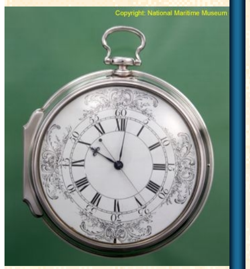
$\boxed{x \equiv 6714 \quad (7980) \quad \Rightarrow \quad \text{Origine en -4712} \quad (\textit{4713 BC})}$



Jours Juliens

- On compte les jours depuis le 1.5 janvier - 4712 (1e janvier à 12h).
- Le jour julien débute à 12h
  - ex : 1.5 jan 2000 = JD 2 451545, 1.0 jan 2000 = JD 2 451544.5,
  - 4 sept 2002 à 11h : 2 452 521.95833
- MJD = JD - 2 400 000.5 , soit une origine au 17 nov 1858 à 0h.
- Jour julien CNES : origine au 1.0 01 1950 = JD - 2 433282.5
  - 04/09/02 à 0h : JD_{cnes} = 19239

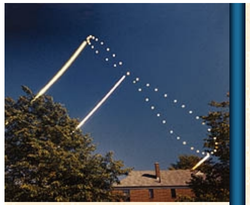
- La date notée dépend du choix du *jour*
  - définition actuelle 1 j = 86400 s
    - sans rapport contraint avec le succession des jours et des nuits
  - pour des observations anciennes il faut préciser le type de JD
    - ex : date en temps solaire ==> JD(TU) :: on compte des jours solaires
    - utilisation d'une éphéméride ==> transformer la date en date de temps dynamique, puis compter les jours à partir du JD.

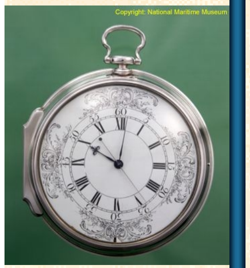


- Epoque julienne (JE)

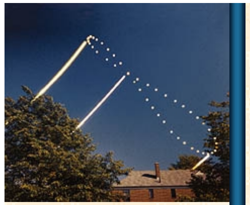
$$JE = 2000.0 + \frac{JD - 2451545.0}{365.25} \quad ; \quad JD = 2451545.0 + (JE - 2000.0) * 365.25$$

4 sept 2002 à 11h00m00s : JD 2 452 521.95833 = 2002.67476613





[Pour occuper vos soirées ….]



Petits problèmes amusants sur le temps- I

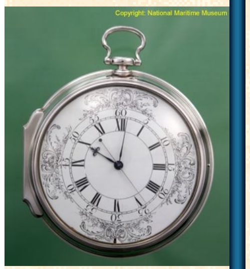
Principe de T2L2 : (Adapté de Martin Gardner, Haha, 1979, Belin)

• Mr et Mme Dupont arrivent dans leur maison de Campagne dont la seule horloge s'est arrêtée. M. Dupont la remonte puis part faire quelques courses au village en à sa femme 'je vais chercher l'heure et je reviens' (il n'a bien sur pas de montre. Il fait ses courses à l'épicerie ou il y a une magnifique horloge et revient par le même chemin et avec le même pas. En rentrant il met l'horloge à l'heure à la stupéfaction de madame 'mais tu connais la distance au village et ta vitesse ? '

• Quelles sont les positions réversibles sur une horloge classique, c'est à dire les cas on l'on peut interchanger les deux aiguilles sans s'en apercevoir.

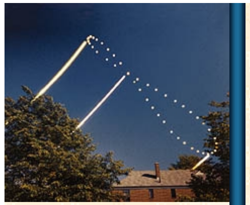
• L'observation du cadran d'une horloge dans un miroir viole-t-elle le principe d' invariance P ? PT ?

• Les aiguilles de ma montre se superposent toutes les 65 mn. Avance-t-elle ou bien retarde-t-elle ? Dans combien de temps le décalage sera de 1 h ?

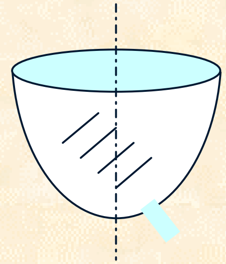


• On possède 5 horloges : l'une fonctionne parfaitement, la deuxième retarde de 1 mn par heure, la troisième avance de 1 mn par heure, la suivante tourne deux fois trop vite et la dernière marche à l'envers. Ce jour elles indiquent toutes la même heure : 4h22m. Cela peut-il se reproduire et quand ?

• Lewis Caroll parle d'une horloge qui retarde de 1 mn par jour et signale qu'elle indique l'heure exacte une fois tous les 4 ans. Êtes-vous d'accord avec lui ?



Petits problèmes amusants sur le temps - II

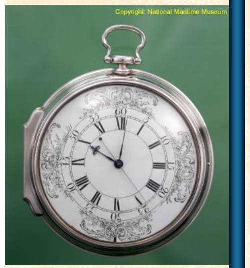


• Donnez la forme méridienne d'une clepsydre de révolution pour que l'écoulement soit uniforme ? Bien réfléchir à la façon dont on introduit la contrainte d'uniformité et à sa signification.

• On considère une montre classique à deux aiguilles et un cadran, dont le cadran est libre de tourner derrière les aiguilles. Pour une heure donnée, par exemple 9h17, quelles sont les rotations permises du cadran, c'est à dire celles qui aboutissent à la lecture d'une heure qui ait un sens ?
Après avoir brillamment résolu cette question, passer au cas où la montre est munie d'une trotteuse.

• Toujours avec cette même montre à trois aiguilles, quelle est la probabilité que la trotteuse se trouve dans l'angle aigu formé par les deux aiguilles ? (ce n'est pas tout à fait 1/4, ce serait trop simple !)

• On considère un ruban infiniment élastique de longueur initiale l_0 = 1 m. Une limace se déplace depuis l'origine de ce ruban à la vitesse de 1 cm/s et toutes les secondes le ruban est étiré de 1m. La limace peut -elle atteindre l'extrémité ? Si oui au bout de combien de temps ?



• Deux train T_1 et T_2 partent au même instant des points A et B distants de 600 km. Ils roulent à une vitesse constante de 150 km/h. Au moment du départ une mouche (il s'agit de l'espèce *Musca megavelocitas,* L.)) quitte le train A en direction du train B et vole à la vitesse de 200 km/h. Lorsqu'elle retrouve le train B, elle fait demi-tour vers le train A et répète ainsi sa ronde jusqu'au crash final. Quelle distance a-t-elle alors parcouru ?
Mais la question intéressante est la suivante : si l'on regarde le problème à l'envers, c'est à dire avec les deux trains qui s'éloignent l'un de l'autre vers les stations A et B. Ou se trouve la mouche entre A et B lorsque les trains parviennent à destination.