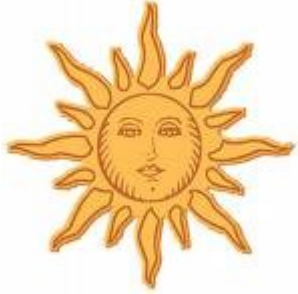


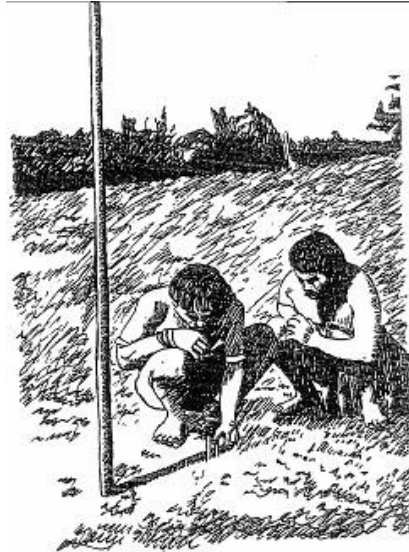
Une histoire de la mesure du temps

Marie-Christine Angonin
UPMC – Observatoire de Paris
(SYRTE)

Mesurer le temps avec le Soleil



Gnomons et cadrans solaires



Héritages des Egyptiens et des Babyloniens

24 heures dans une journée (inégales ou temporelles)

Heures équinoxiales = heures égales

60 minutes par heure

60 secondes par minute

Mesurer le temps avec le Soleil



Gnomons et cadrans solaires

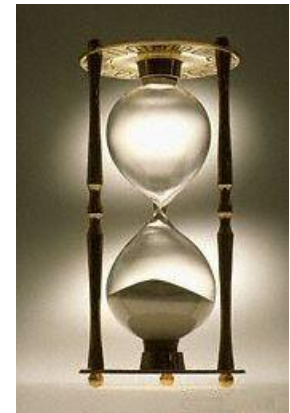


Mesurer le temps avec un phénomène « linéaire »

Écoulements : clepsydes



sabliers



Combustion : bougies



Lampe à huile



Linéarité de l'écoulement dans une clepsydre



La graduation donne l'heure (temporaire ou égale)

Mais l'écoulement doit rester régulier

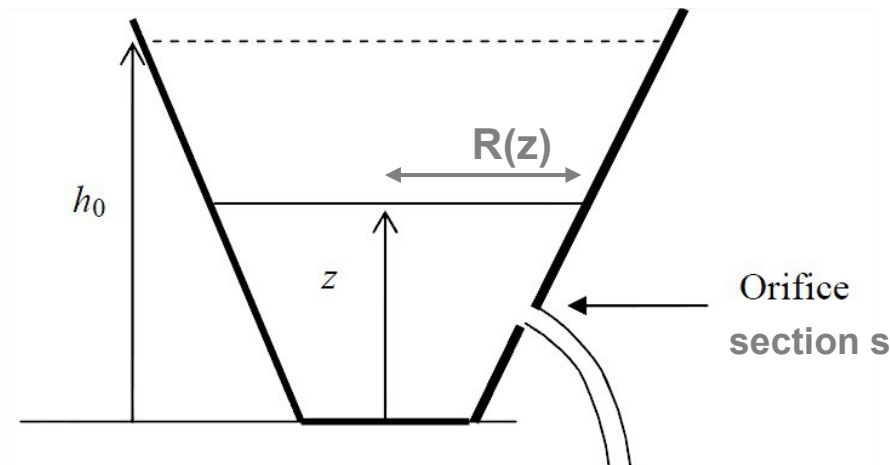
Linéarité de l'écoulement dans une clepsydre

Théorème de Bernoulli → conservation de l'énergie :

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgz + pV = cte$$

Forme du vase pour assurer la linéarité de l'écoulement :

$$z = \frac{\pi^2 K^2}{2g \cdot s^2} \cdot R^4$$





Su Song (XI^{ème} siècle)

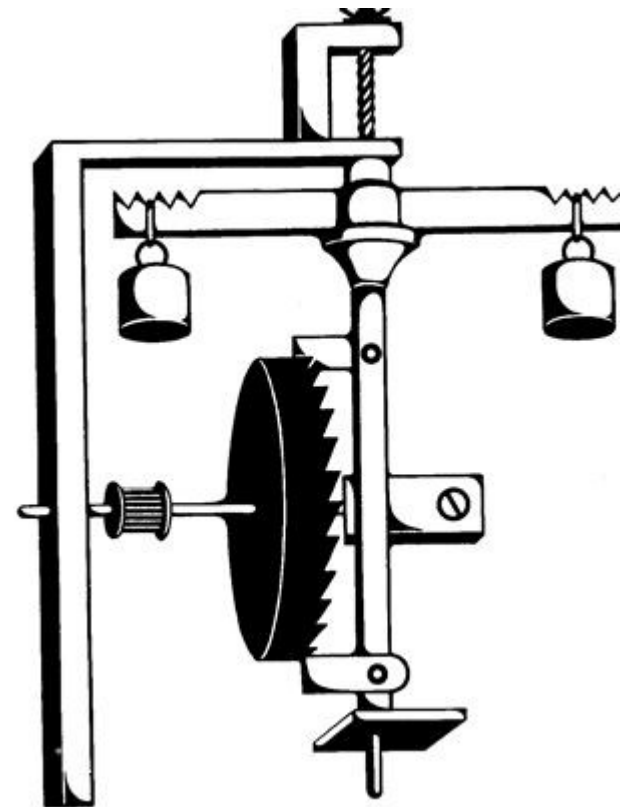


Al Jazari (XII^{ème} siècle)

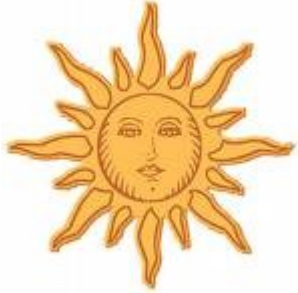


Astrarium de Dondi XIVème siècle

(Reproduction de
l'Observatoire de Paris)



Mesurer le temps avec la rotation de la Terre



Gnomons et cadrans solaires



Mesure du Temps = Connaissance de
l'angle de rotation de la Terre

$$\omega = 7,292 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$



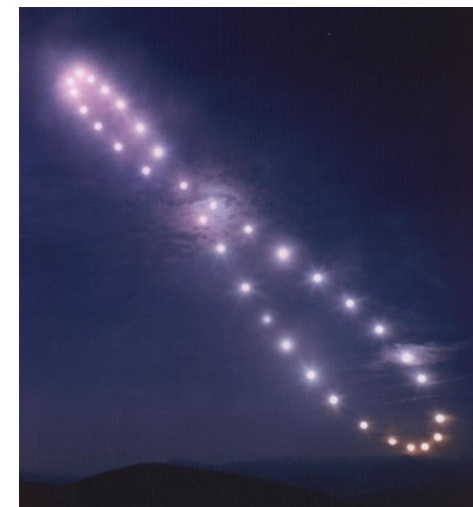
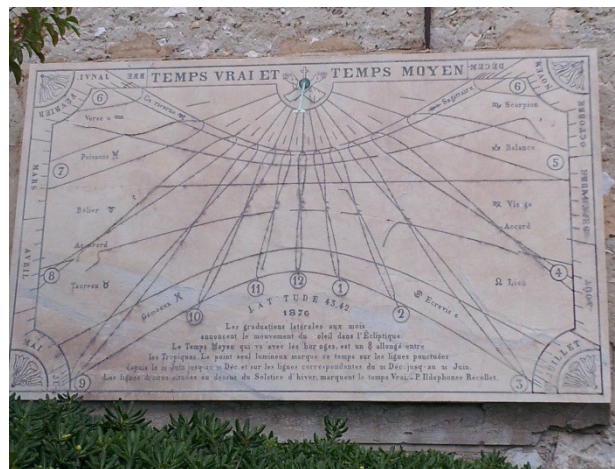
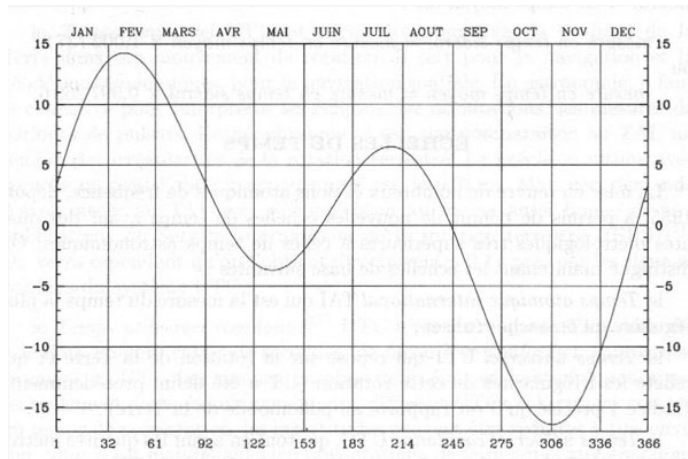
Mesurer le temps avec la rotation de la Terre

Jour sidéral : durée mise par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même (par rapport aux étoiles) → 23 h 56 min 04 s = 86 164 s

« Jour » solaire (« temps solaire vrai ») : durée pour retrouver le soleil suivant le même méridien

« Temps solaire moyen » : durée moyenne du jour solaire en supposant que le soleil se « déplace » à vitesse constante (on néglige l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre et l'ellipticité de son orbite) → 24 h = 86 400 s

→ L'écart (temps moyen – temps vrai) est inférieur à +/- 15 min



Échelles de temps astronomiques

Jusqu'en 1956, la seconde était la fraction $1/86\,400$ du jour solaire moyen (*le temps universel TU*)

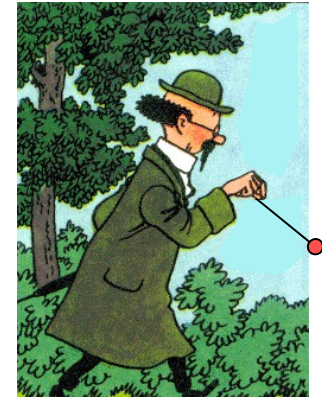
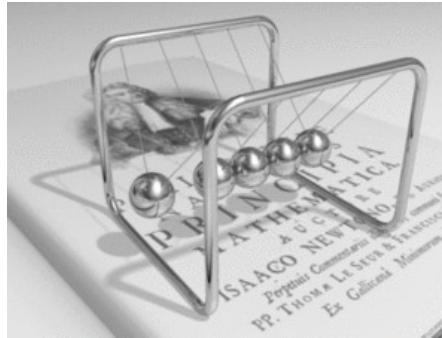
De 1956 à 1967, la seconde était la fraction $1/31\,556\,925,974\,7$ de l'année tropique 1900 (*le temps des éphémérides TE*);

« **Astronomie** »

Année tropique = 365,2422 jours solaires = 366,2422 jours sidéraux

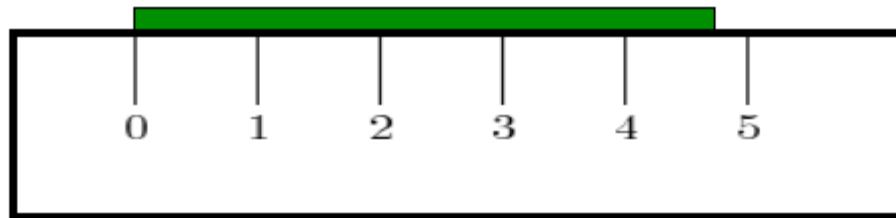
Mesurer le temps avec un oscillateur

Oscillateur = Système dont une caractéristique se reproduit périodiquement



Mesurer une distance avec une règle

→ On compte le nombre de graduations

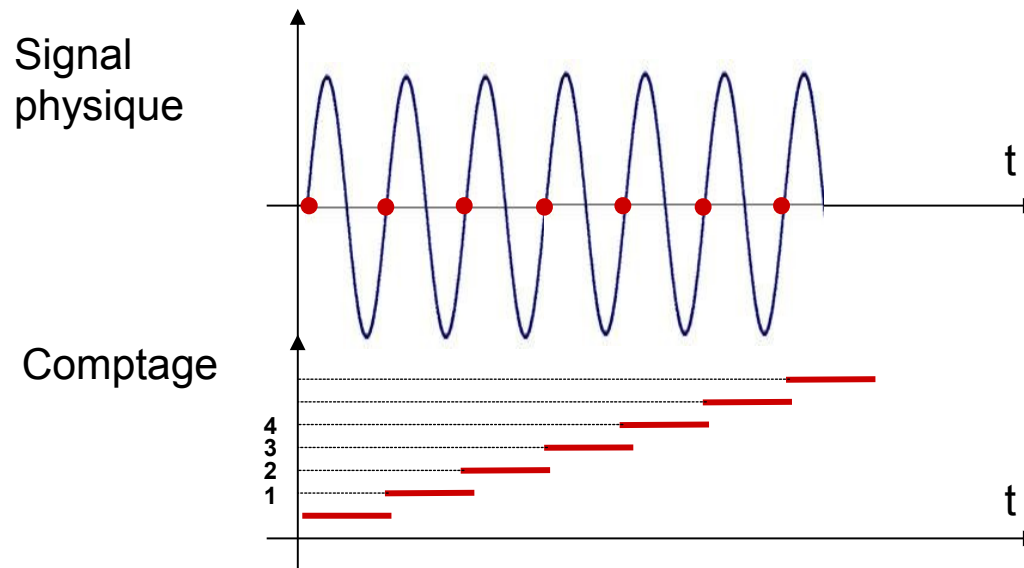


Mesurer le temps avec un oscillateur

Oscillateur = « règle temporelle »

Graduation élémentaire = période

→ On mesure une durée en comptant le nombre d'oscillations

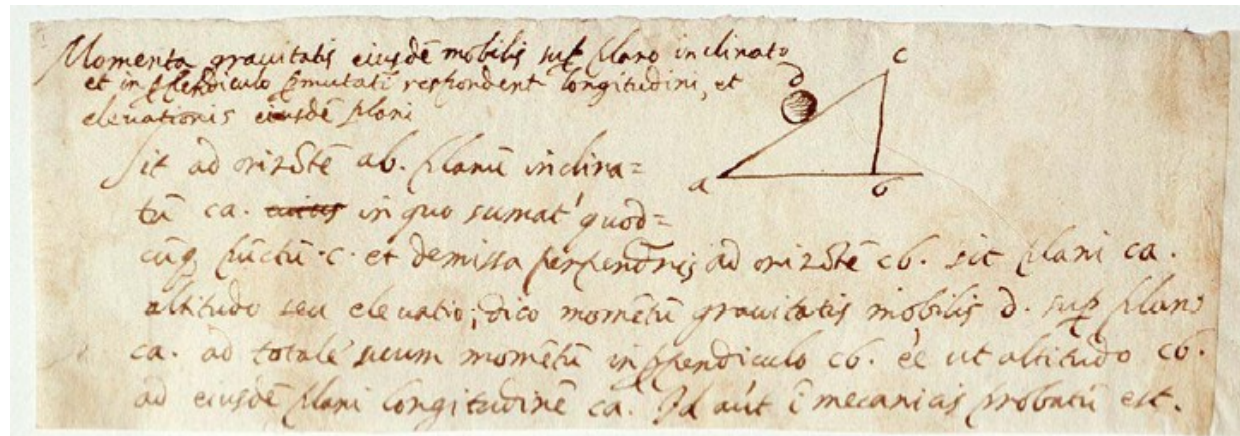
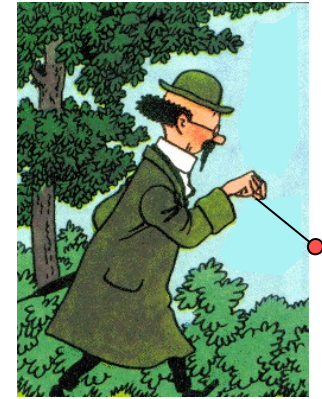
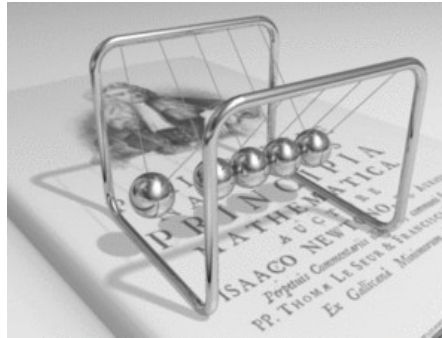


Mesurer le temps avec un oscillateur

Oscillateur = Système dont une caractéristique se reproduit périodiquement



Galileo Galilei
(1638)



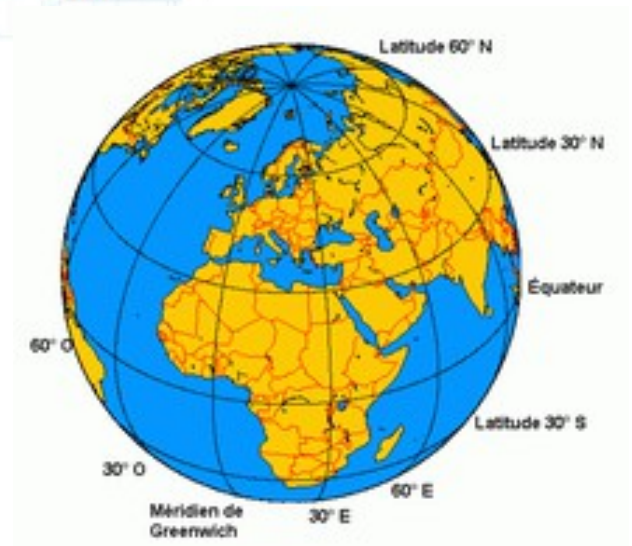
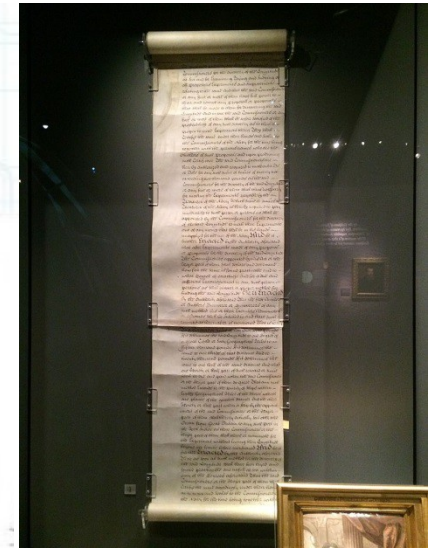


Horloge astronomique
De Pierre Fardoil XVIIIème siècle

(Observatoire de Paris)

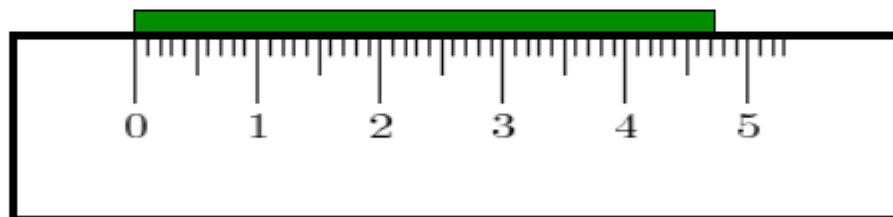
Détermination de la longitude

- **Cassini** propose en 1668 une méthode basée sur l'observation des **lunes de Jupiter** → mais non applicable en mer
- Le désastre naval de Sorlingues (1707): l'Amiral Shovell perd 4 navires et 2000 hommes
- **Longitude Act** (1714) → prix de 20000 livres pour qui trouverait une méthode de détermination de la longitude au demi-degré près



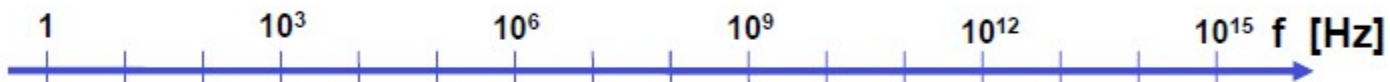
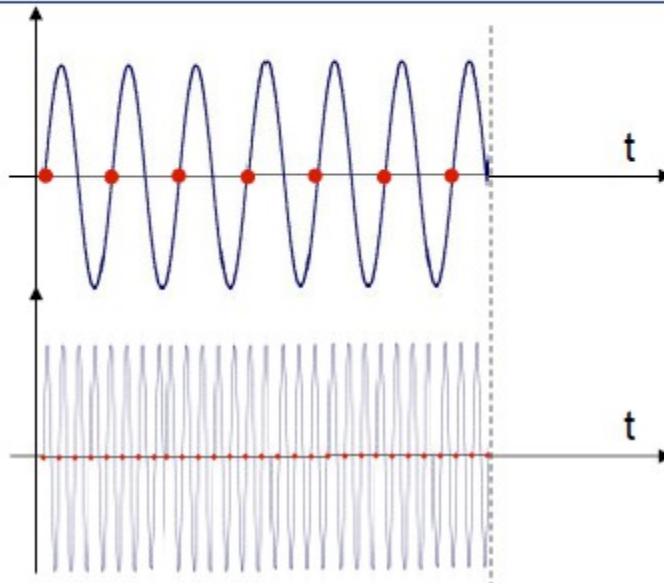
Mesurer une distance avec une règle

→ Importance de la finesse des graduations



Importance de la fréquence d'oscillation

→ Intérêt d'avoir
une grande fréquence



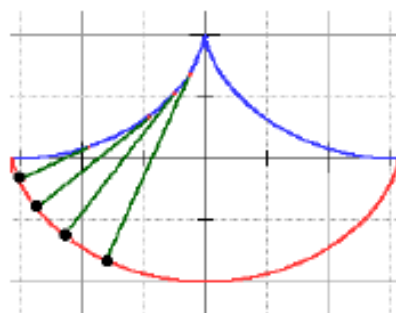
Oscillateur → mécanique



Exemple du pendule oscillant

Fréquence du pendule
$$\nu \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \left(1 - \frac{1}{16} \theta_0^2 \right)$$

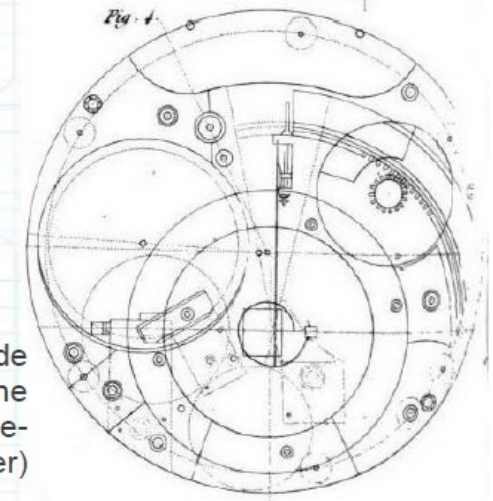
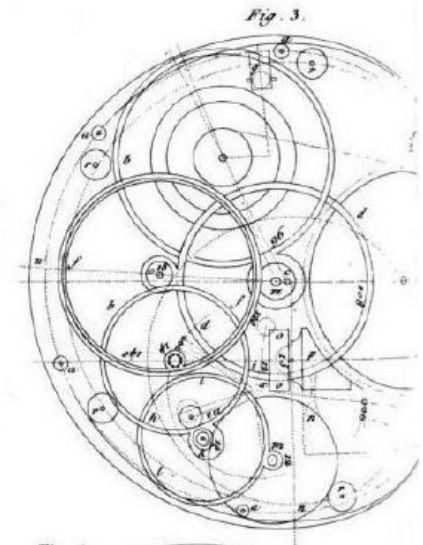
- **défaut d'isochronisme**
(amélioration par Huygens : pendule cycloïdal)



- **sensibilité à g** → 9.83 m.s⁻² aux pôles ; 9.78 m.s⁻² à l'équateur + variations locales + effets des marées : 3. 10⁻⁶ g
- **sensibilité à la pression** → horloges à pression constante
- **sensibilité à la température** (avec une tige en acier, une horloge retarde de 0,5 seconde par jour quand la température augmente de 1°C)
 - associations de métaux de dilatations opposées
 - utilisation de l'invar (horloges astronomiques)

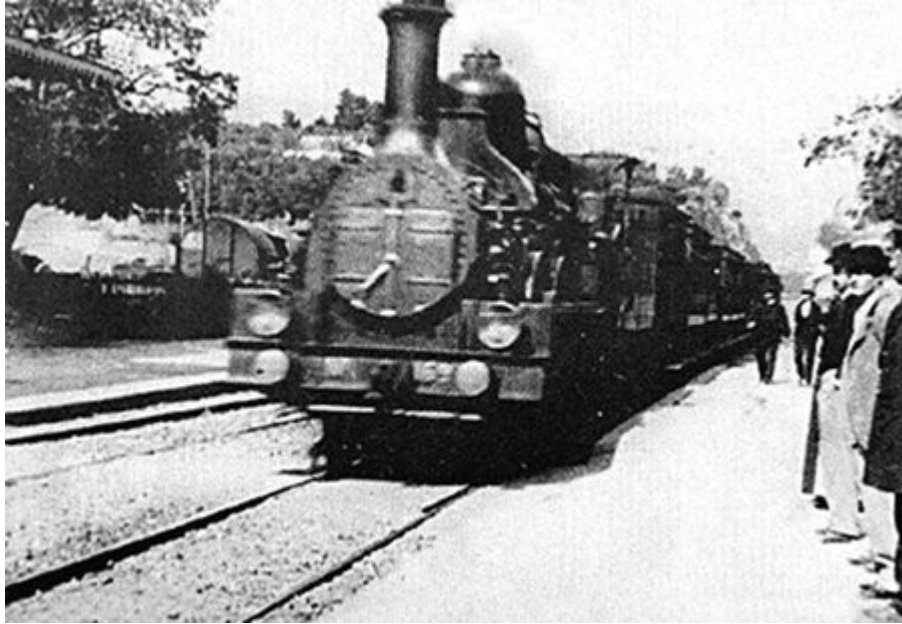
Détermination de la longitude

- **Cassini** propose en 1668 une méthode basée sur l'observation des **lunes de Jupiter** → mais non applicable en mer
- Le désastre naval de Sorlingues (1707): l'Amiral Shovell perd 4 navires et 2000 hommes
- **Longitude Act** (1714) → prix de 20000 livres pour qui trouverait une méthode de détermination de la longitude au demi-degré près
- John Harrison et son fils reçurent la moitié du prix en 1765 et l'autre en 1773



Dessins du chronomètre H4 de Harrison, construit en 1761 (The Principles of Mr Harrison's Time-keeper)

Évolution des besoins au XIXème



Transports

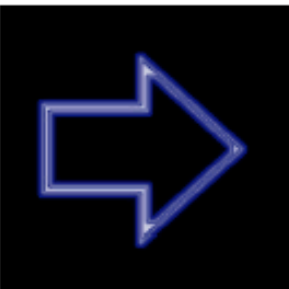
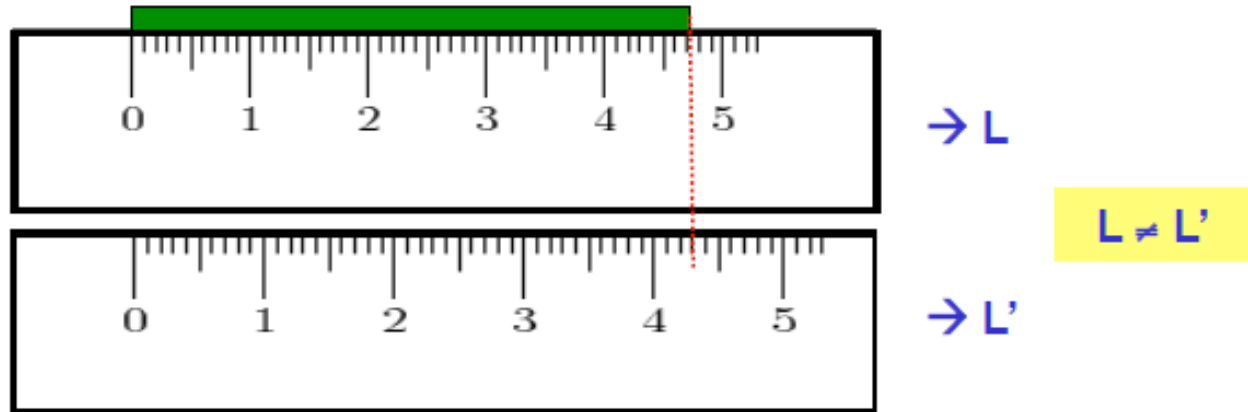


Communications



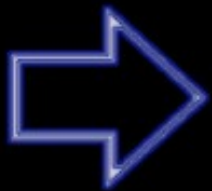
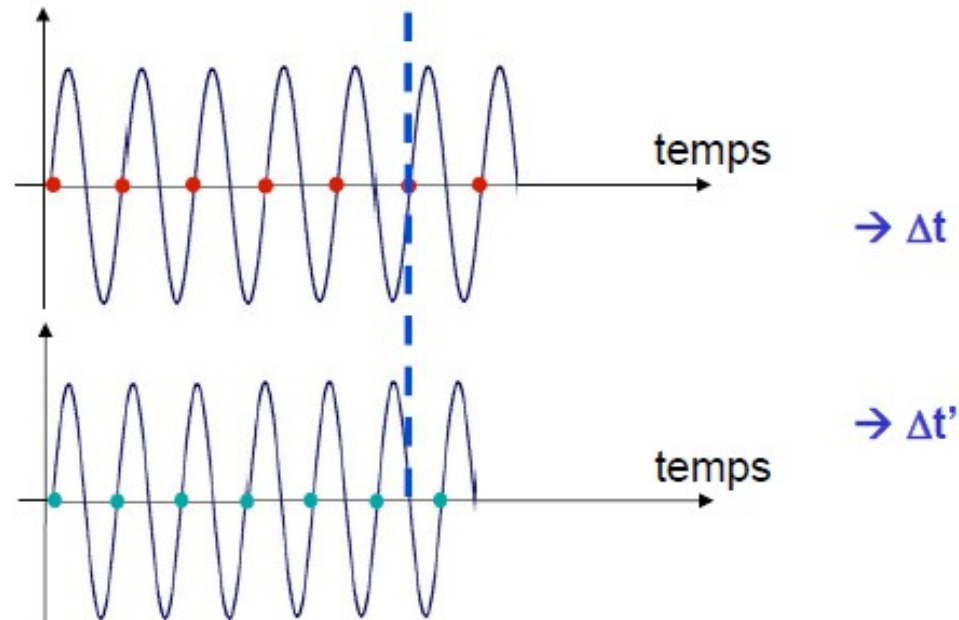
Mesurer une distance avec une règle

→ Importance de la confiance (stabilité, exactitude) dans les graduations



Qualité de la mesure d'une longueur
=
qualité de la graduation de la règle
&
nombre de graduations

Mesurer une distance avec une règle



Qualité de la mesure d'une durée
=
qualité de la fréquence (« graduation temporelle »)
&
nombre de périodes comptées

Le temps légal et l'Observatoire de Paris

1891 : Unification de l'heure – Méridien de Paris



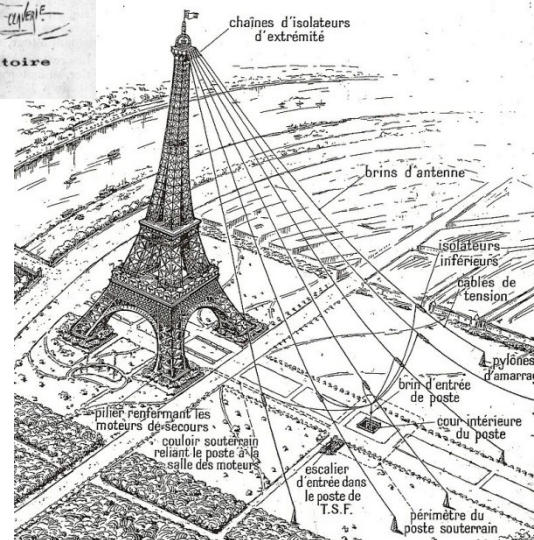
1911 : Méridien de Greenwich (GMT)

ARTICLE UNIQUE. — L'heure légale en France et en Algérie est l'heure, temps moyen de Paris, retardée de neuf minutes vingt-et-une secondes.

Comment synchroniser deux horloges ?



Comparaison directe ...

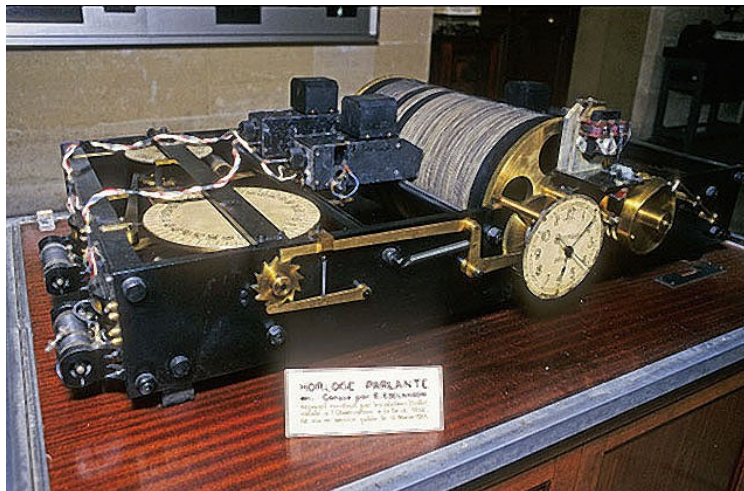


... ou à distance

L'horloge parlante

Incertitude dans la
synchronisation ~ 50 ms

1933



1991

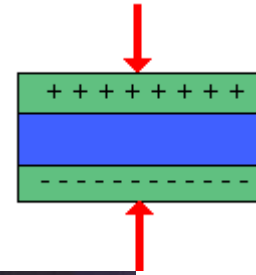


Les oscillateurs à quartz

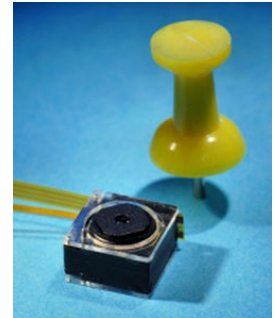
Piézoélectricité (P. Curie, 1880) :

Déformation mécanique $\leftarrow \rightarrow$ **Signal électrique**

Utilisés dans les oscillateurs à quartz

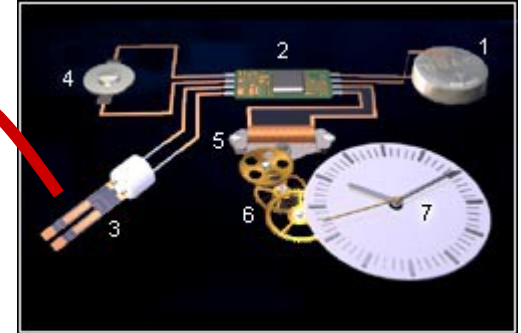


(aussi dans les filtres électroniques, tourne-disques, allume-gaz, moteurs auto-focus, balances, capteurs de température, de pression, d'accélération, de rotation, ...)



Les oscillateurs à quartz

Différents type de résonateurs à quartz :



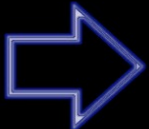
$$F_0 = 32\,768 \text{ Hz} \rightarrow 1 \text{ Hz (division par } 2^{15})$$

Sensibilité à la température :

La fréquence est « exacte » pour $T = T_0$

Pour un écart de température de 10 °C : écart en temps de 2 minutes par an

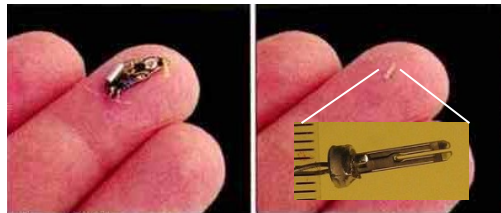
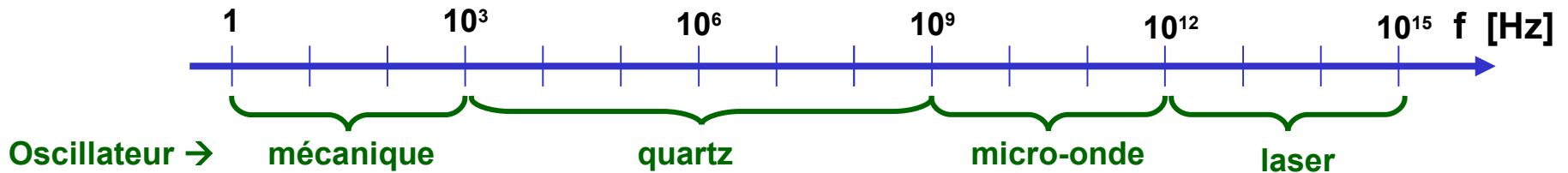
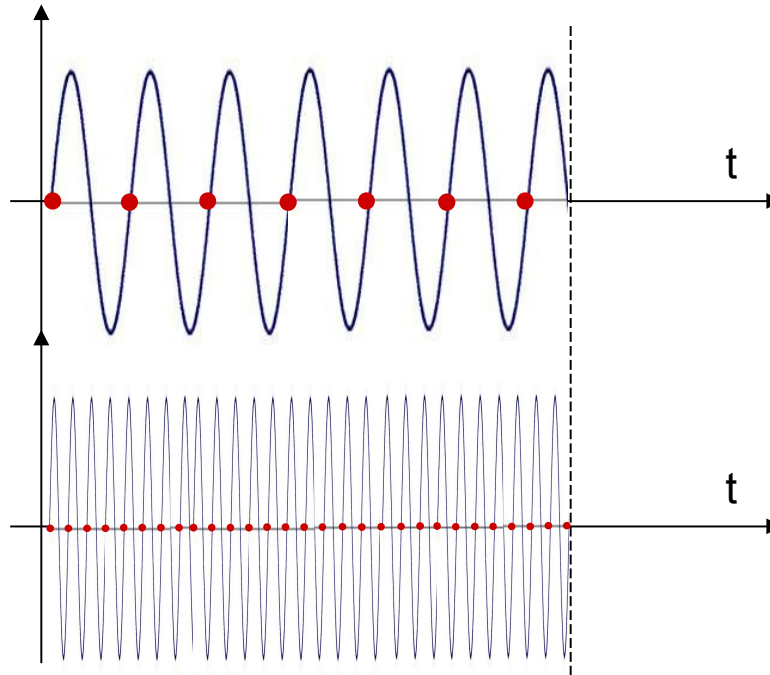
Pour un écart de température de 20 °C : écart en temps de 8 minutes par an



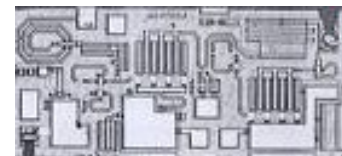
La fréquence dépend de la géométrie, de l'environnement, du vieillissement, ...

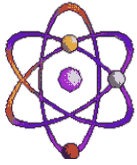
Importance de la fréquence d'oscillation

→ Intérêt d'avoir
une grande fréquence



Vi. Toscas/Gal 27





L'atome : enfin une référence universelleet (quasi) parfaite

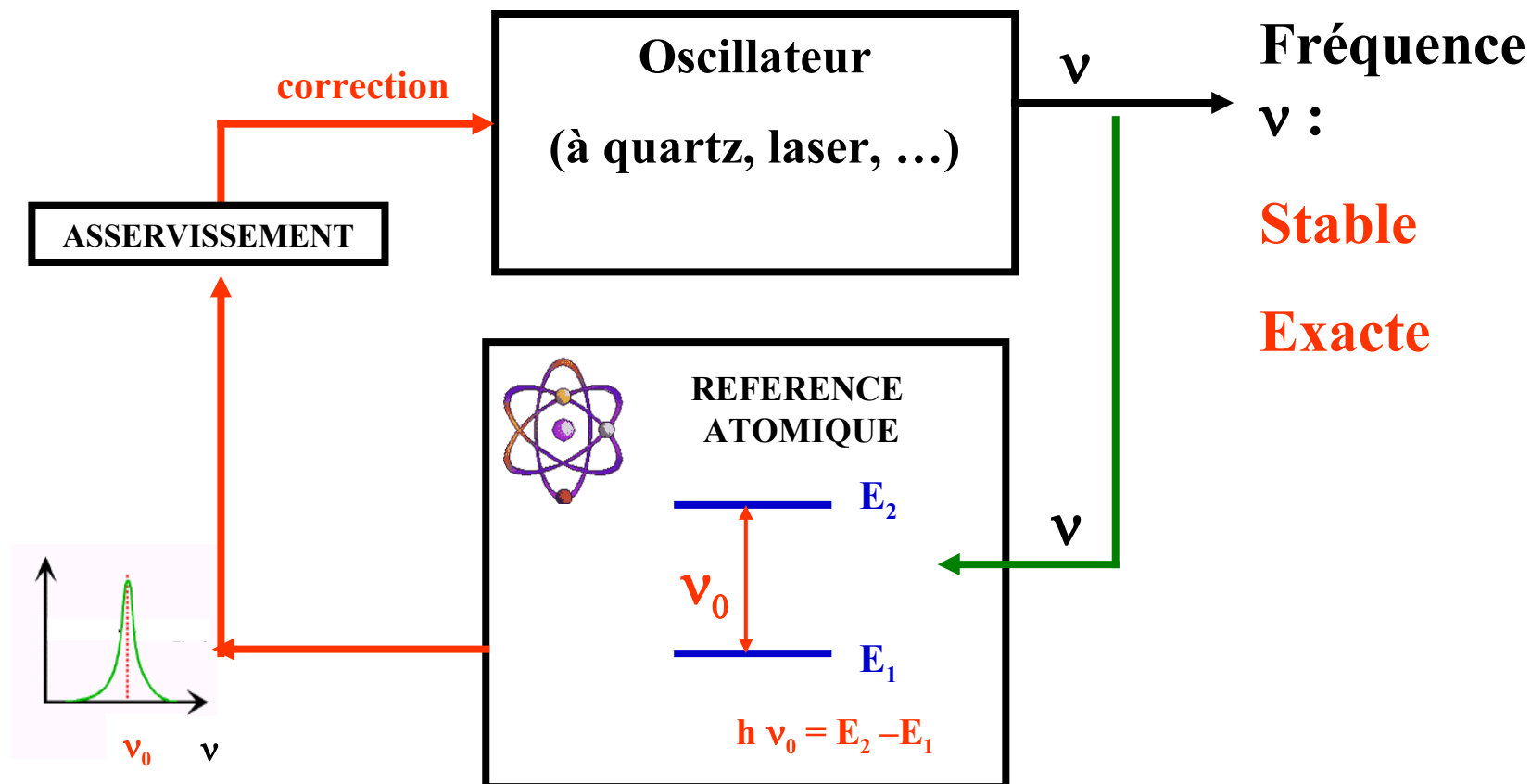
→ un atome est un système qui peut entrer en résonance lorsqu'il interagit avec une onde e.m. de fréquence appropriée

→ les fréquences de résonance correspondent à des transitions de l'atome entre des niveaux d'énergie bien particuliers (« carte d'identité » atomique)

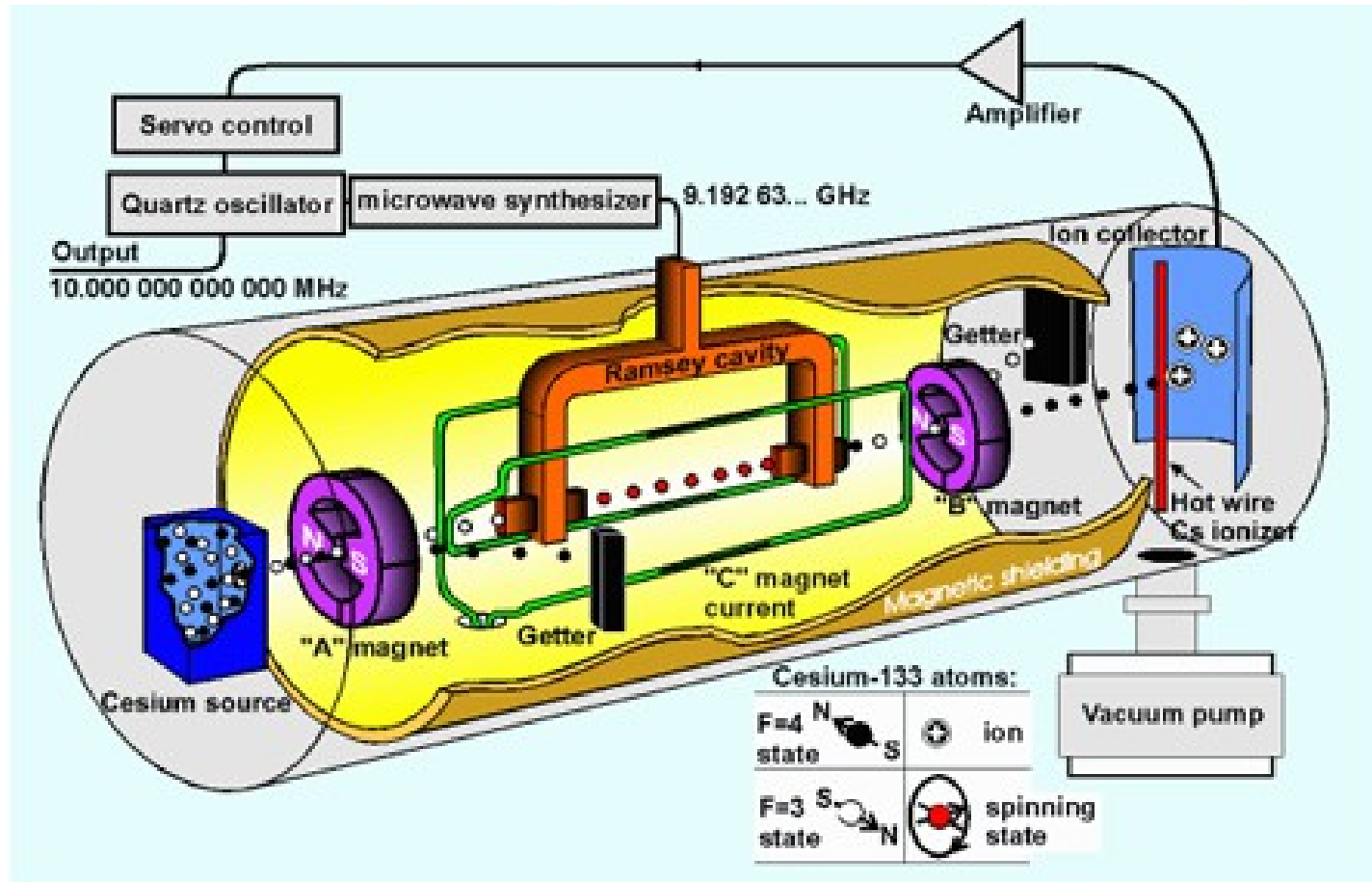
→ ces fréquences ne dépendent (a priori...) que des constantes fondamentales

→ un atome ne vieillit pas, ne s'use pas ...

Principe de fonctionnement d'une horloge atomique

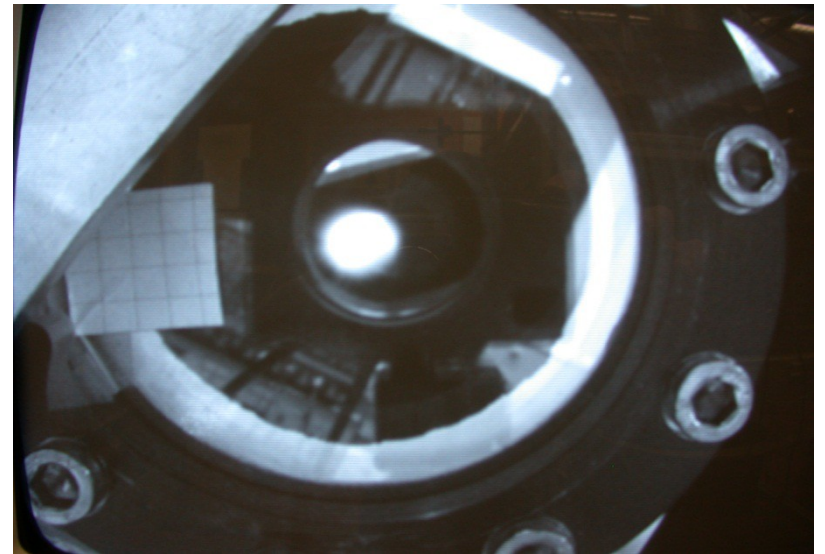
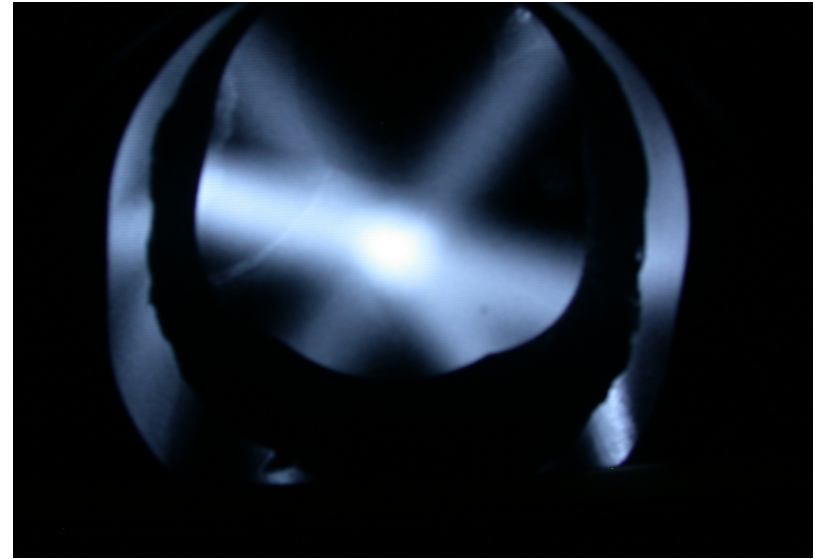
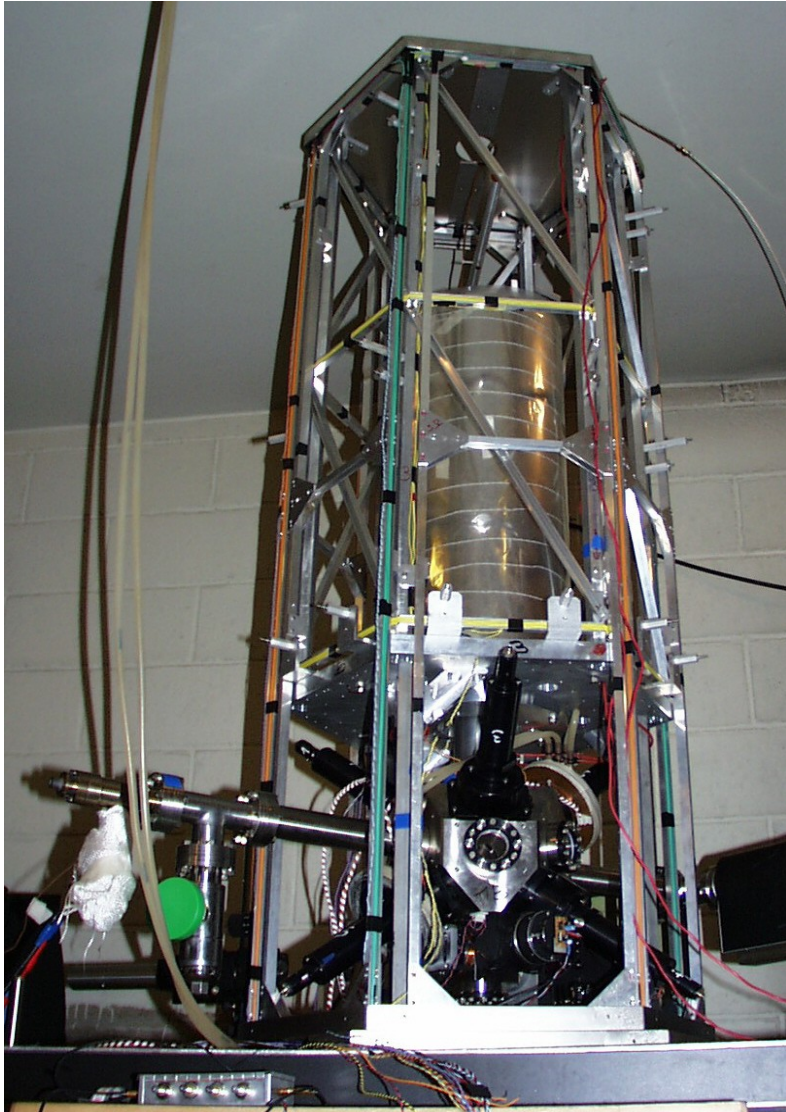


Horloge à jet de césium (2 impulsions)



<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/services/time/faq/index.html>

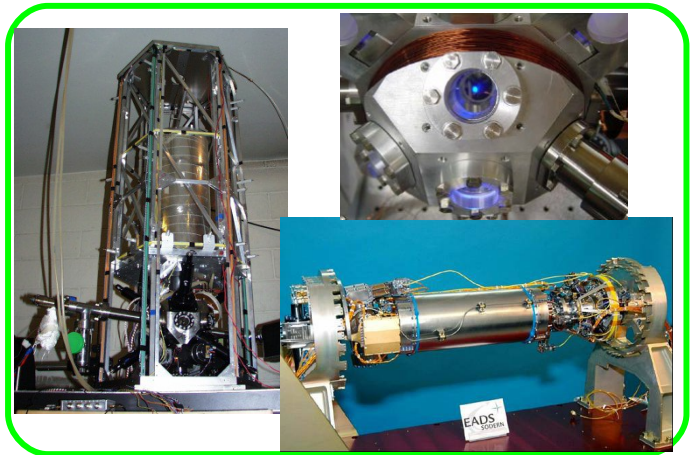
Zone de capture : boule d'atomes froids



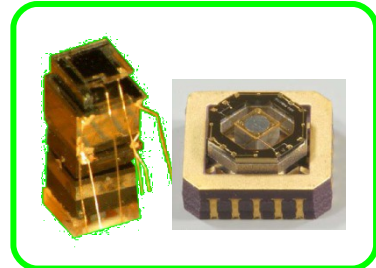
Une grande famille

↑ Performances

Horloges commerciales :
industrie, laboratoires, GNSS, ...



Horloges de laboratoire :
Métrie et physique fondamentales



Horloges miniatures :
Industrie, récepteurs GPS/GALILEO

→ Volume

1 cm³

1 dm³

1 m³

... au-delà des fontaines à atomes froids



Les horloges optiques :

→ 500 000 000 000 000 battements par seconde !!!

→ Fréquence 50 000 fois plus grande que pour les horloges micro-ondes (Césium)

Age de l'univers

1 milliard an

1 Million an

1000 an

1 an

1 jour

1 heure

erreur de 1 seconde au bout de :

1600

1700

1800

1900

2000

Pendule de Huygens

Horloge de Harrison

Horloge de Shortt

Oscillateur à quartz

Première horloge atomique

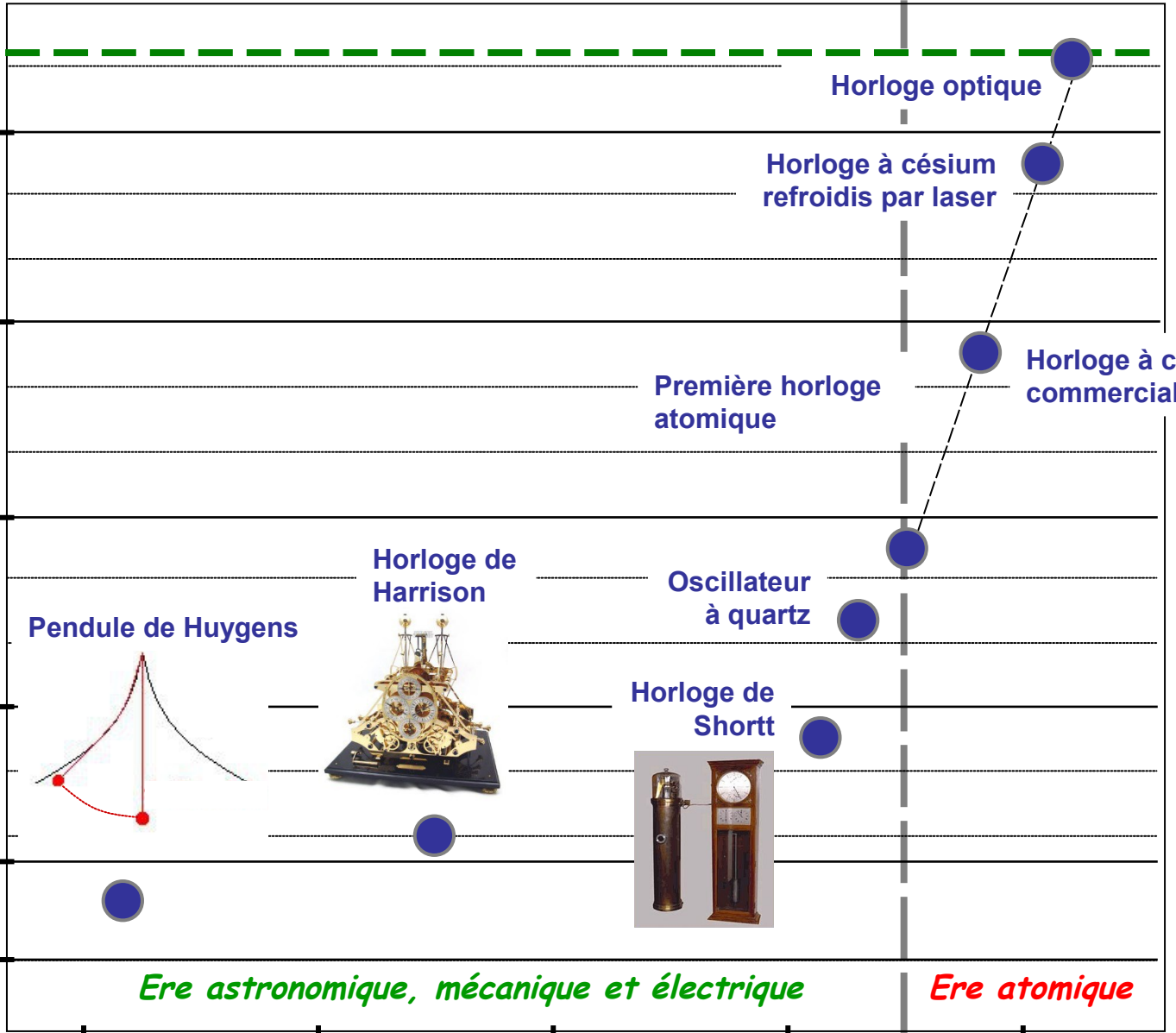
Horloge à césium refroidis par laser

Horloge optique

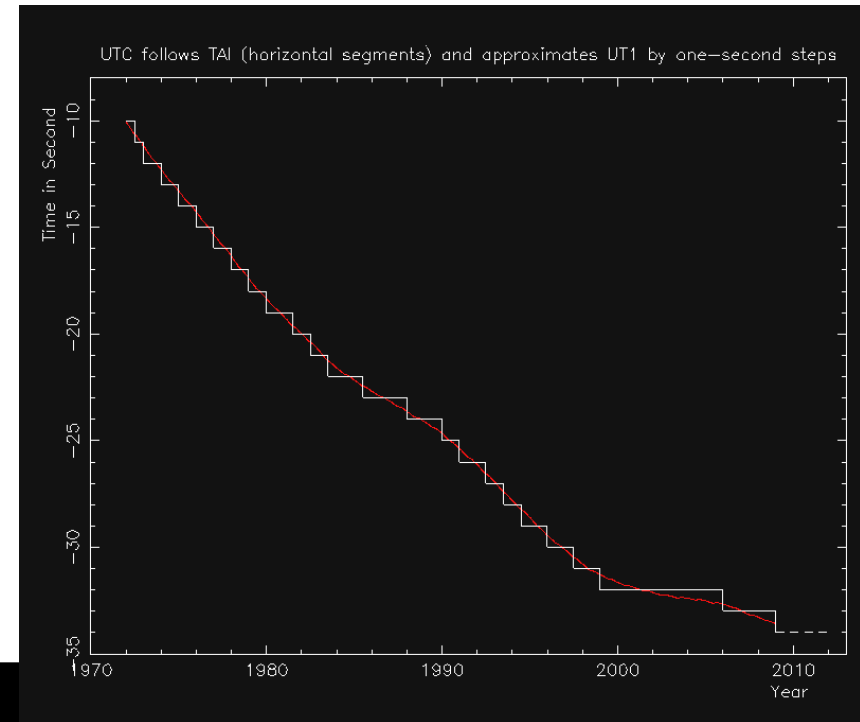
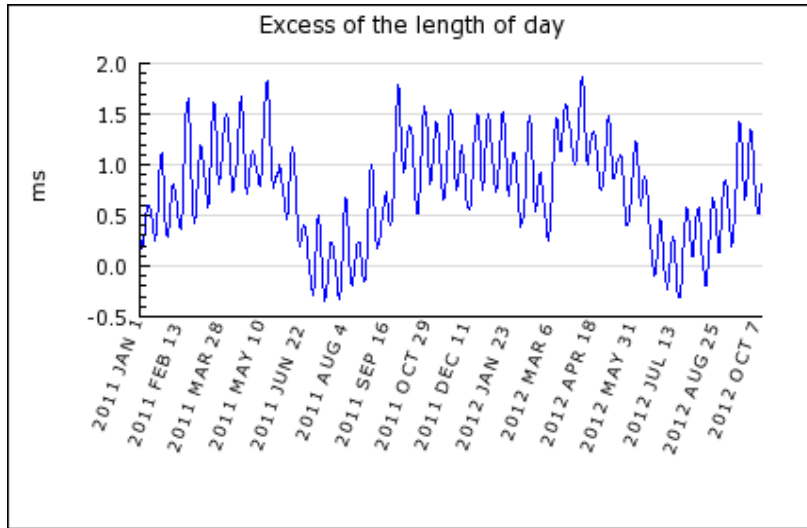
Horloge à césium commerciale

Ere astronomique, mécanique et électrique

Ere atomique



Mesurer le temps avec la rotation de la Terre



... et la Terre n'a pas une rotation régulière
(dissipation par les marées, effets
atmosphériques, hydrologiques, ...)

→ Dérive de la seconde définie à partir de la
rotation de la Terre



Le temps devient officiellement atomique en 1967

Qualités : Uniforme (stable), Reproductible, Universelle

Jusqu'en 1956, la seconde était la fraction $1/86\,400$ du jour solaire moyen (*le temps universel TU*)

De 1956 à 1967, la seconde était la fraction $1/31\,556\,925,974\,7$ de l'année tropique 1900 (*le temps des éphémérides TE*);

Depuis 1967, 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 (*le temps atomique TAI*)

« Astronomie »

« Physique atomique »

Le temps légal et l'Observatoire de Paris

1891 : Unification de l'heure – Méridien de Paris



1911 : Méridien de Greenwich (GMT)

ARTICLE UNIQUE. — L'heure légale en France et en Algérie est l'heure, temps moyen de Paris, retardée de neuf minutes vingt-et-une secondes.

1978 : Temps atomique international

Temps Atomique International (TAI)

Le Temps Atomique International 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.

Echelles de temps atomique

Construction d'échelles de temps atomique par le BIPM



Temps Atomique International (TAI) :

construit par 350 horloges commerciales + exactitude et stabilité long terme assurées par des horloges ultrastables de laboratoire

Mesure et théories du Temps

- Gnomons, cadrans solaires
- Clepsydras (eau, sables)
- Combustion (bougie, hauteur d'huile)

antiquité

Principe de relativité de Galilée → le temps reste absolu (Newton)

- Horloge mécanique

Moyen-âge

- Horloges à quartz
→ Piézoélectricité

XXème siècle

- Horloges atomiques

Principe de relativité du temps (Einstein)

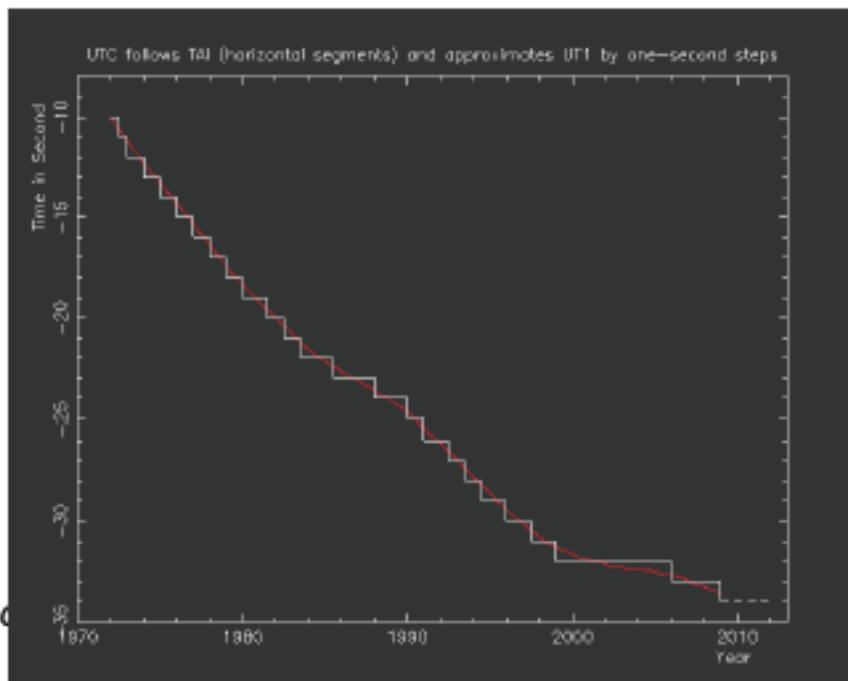
Echelles de temps atomique

Construction d' échelles de temps atomique par le BIPM

Temps Atomique International – TAI (Echelle de temps continue)



Temps Universel Coordonné – UTC (incluant des secondes intercalaires)



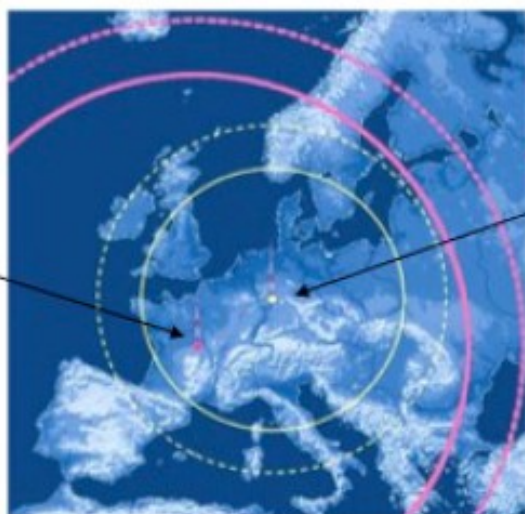
Actuellement :

$$\text{UTC} - \text{TAI} = 37 \text{ s}$$

Radio-pilotage par ondes hertziennes



**Emetteur d'Allouis
(Cher)**
162 kHz (France Inter),
1 MW



**Emetteur de Mainflingen
(Allemagne)**
77 kHz (DCF 77), 50 kW



Diffusion d'échelles de temps atomique

ntp-p1.obspm.fr

Horloge parlante



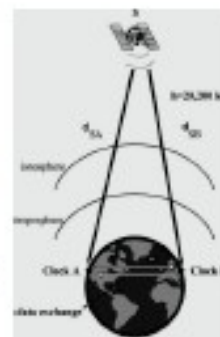
Réseau hertzien



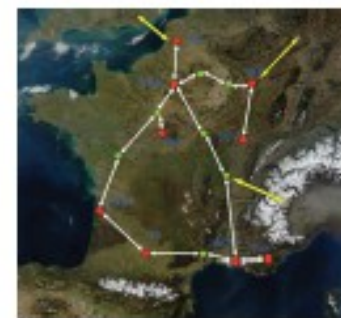
**Internet
(NTP)**



Satellites



**Lien laser
fibré**



Précision :

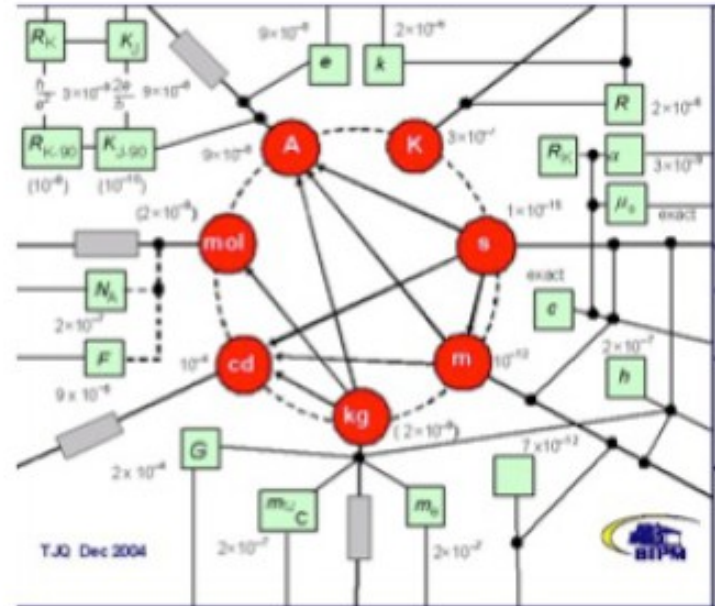
1 - 50 ms

1 ns

< 100 ps

Métrologie fondamentale

(Re)définition des unités



Construction d'échelles de temps atomique



Métrologie

La quantité physique que l'on mesure avec la meilleure précision est la fréquence.

Seconde :

La seconde correspond à la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation associée à la transition entre deux niveaux hyperfins $F=3$ et $F=4$ de l'état fondamental $6S_{1/2}$ du césium 133.

(13ème Conférence Générale des Poids et Mesures, 1967)

Mètre :

Longueur parcourue par la lumière dans le vide pendant un intervalle de temps de $1/299\,792\,458$ s.

(Relativité : $c = 299\,792\,458$ m/s, 1983)

Age de l'univers

1 milliard an

1 Million an

1000 an

1 an

1 jour

1 heure

erreur de 1 seconde au bout de :

1600

1700

1800

1900

2000

Pendule de Huygens

Horloge de Harrison

Oscillateur à quartz

Horloge de Shortt

Horloge optique

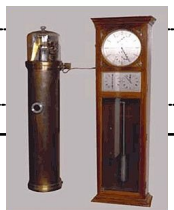
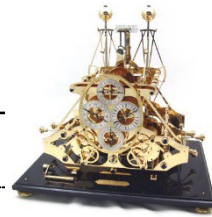
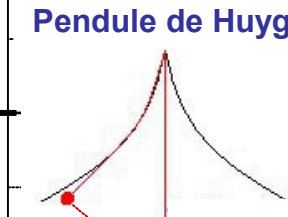
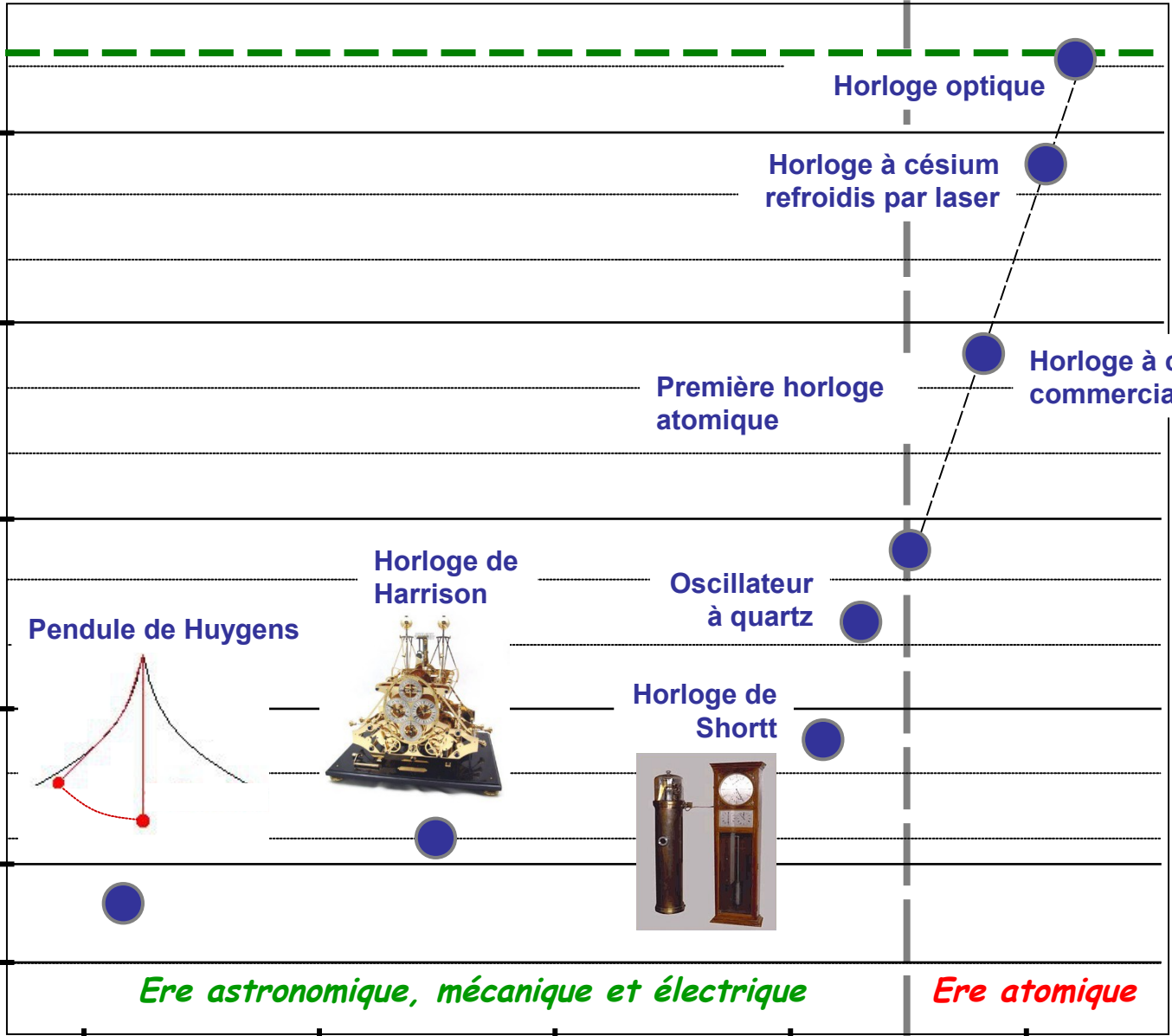
Horloge à césium refroidis par laser

Première horloge atomique

Horloge à césium commerciale

Ere astronomique, mécanique et électrique

Ere atomique

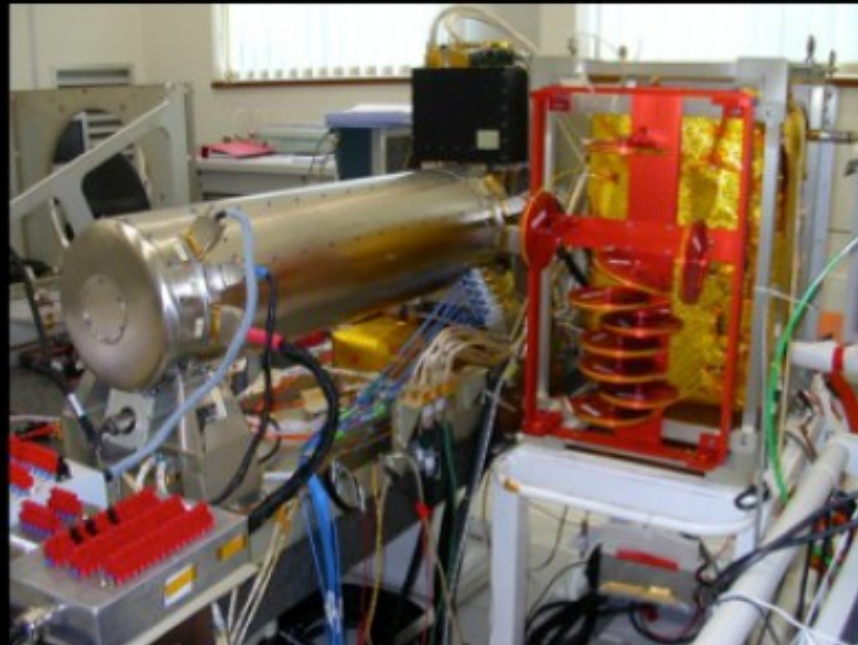
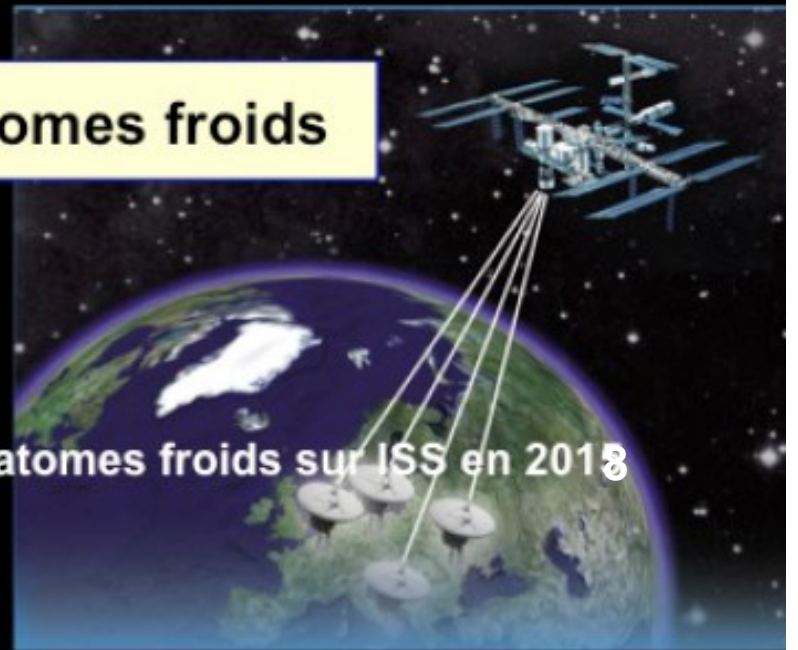


... au-delà des fontaines à atomes froids

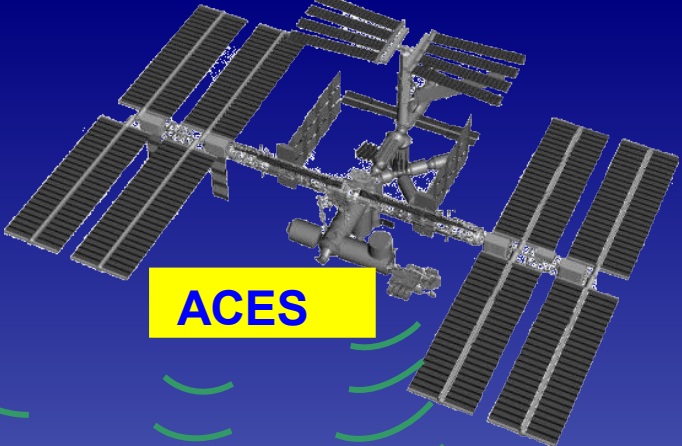


L' Espace:

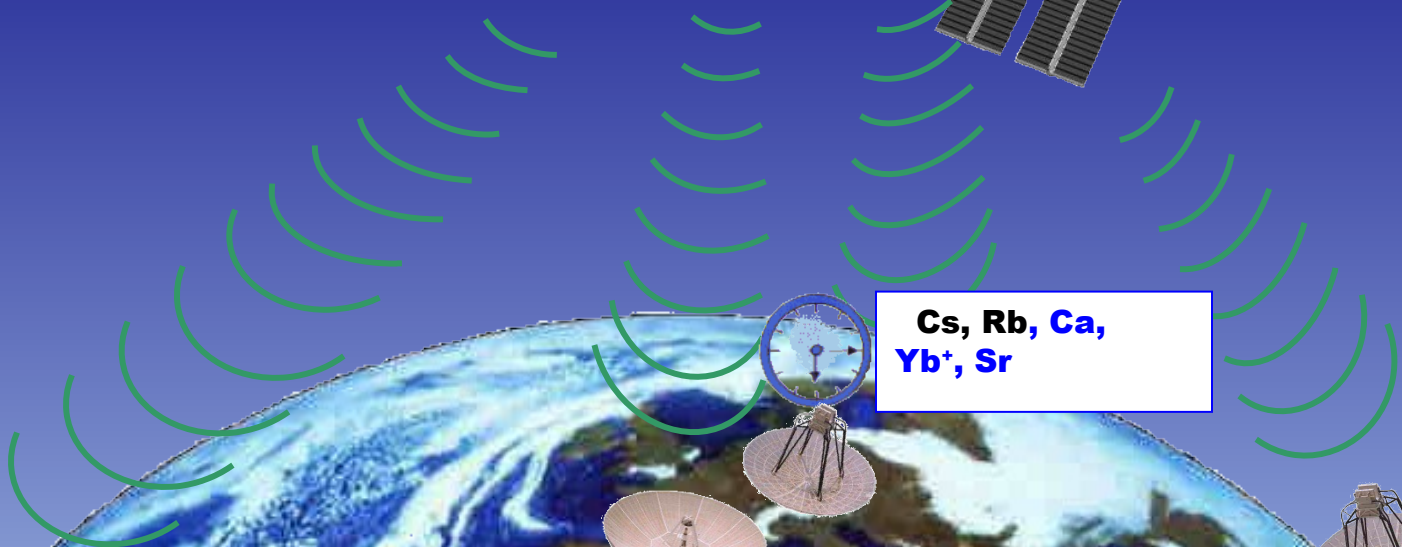
→ PHARAO : horloge à atomes froids sur ISS en 2018



ACES



ACES



**Cs, Rb, Ca,
Yb⁺, Sr**

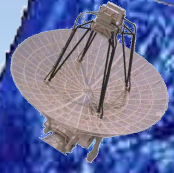
**Cs, Rb, Sr, Hg
H, In⁺, Mg, Ag**

Cs, Yb⁺, Yb⁺,

**Cs, Hg⁺
Al⁺, Sr,
Ca, Yb**

Cs, Rb

**Cs, Rb, Sr⁺,
Yb⁺**



Tests des lois fondamentales de la physique

Tests de la théorie de la relativité :

- La vitesse de la lumière est-elle constante / isotrope ? → OUI à 10^{-10} près
- Les constantes fondamentales sont-elles constantes ? → OUI à 10^{-16} / an près

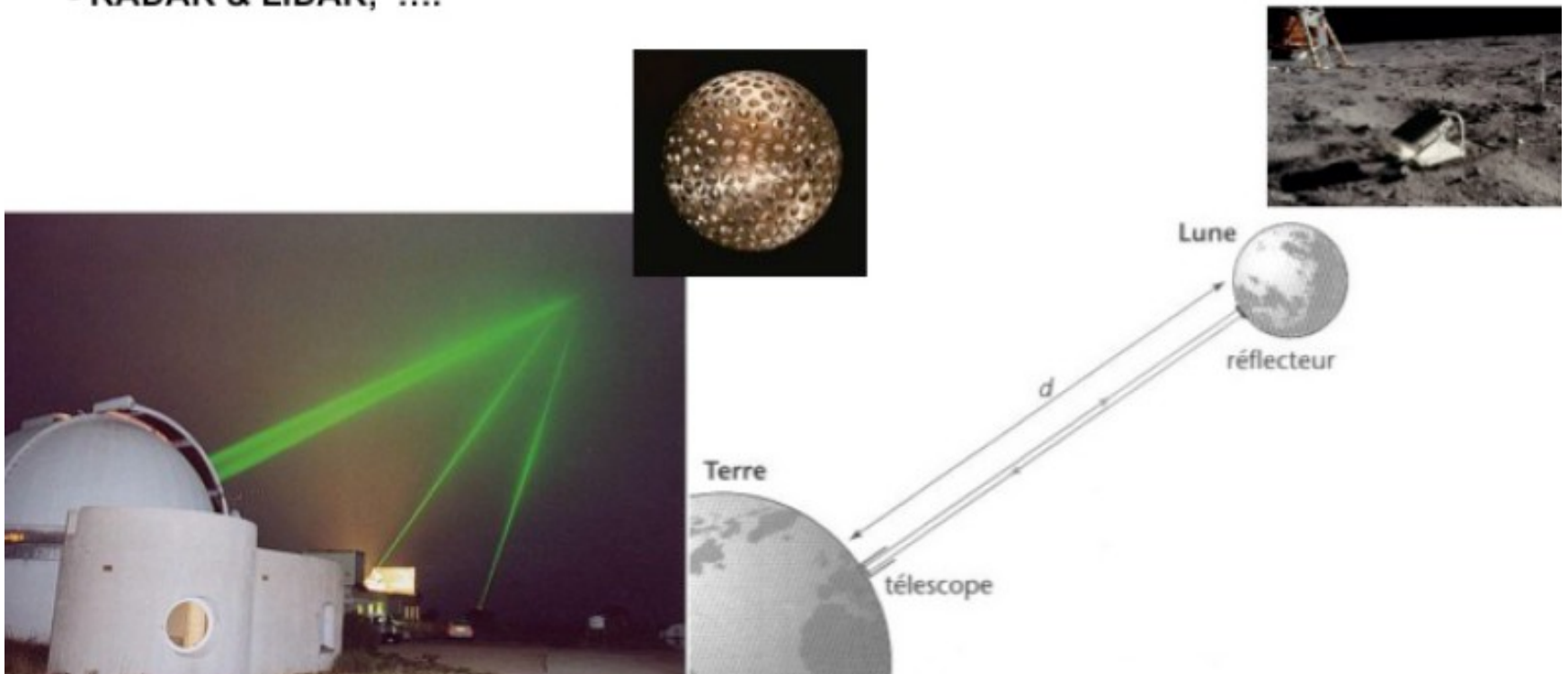


Mesures de fréquences d'horloges dans différents référentiels et/ou à différents instants

Mesures de distances

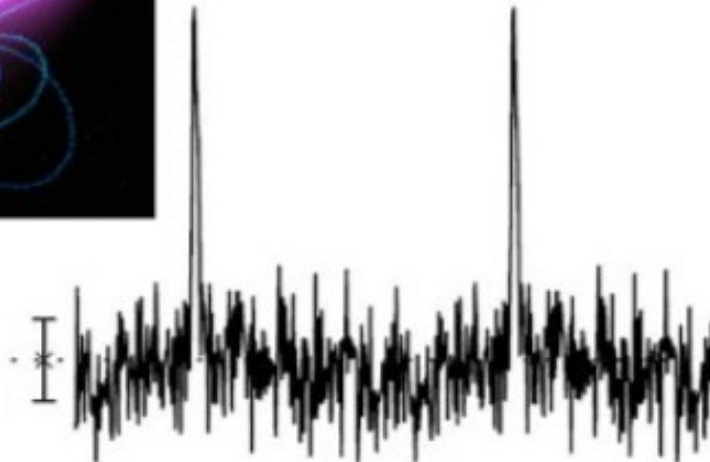
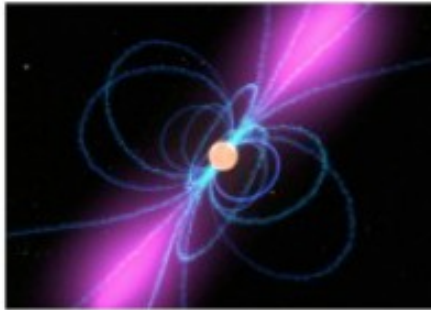
→ *Mesure de durée = mesure de distance ($d = c \cdot \Delta t$)*

- Télémétrie ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s} \rightarrow 30 \text{ cm}$)
- Télémétrie Laser-Lune ou laser-satellite pour l'orbitographie, mesure de la distance Terre-Lune, tests de physique fondamentale, orientation de la Terre, ...)
- RADAR & LIDAR,



Autres applications en astrophysique

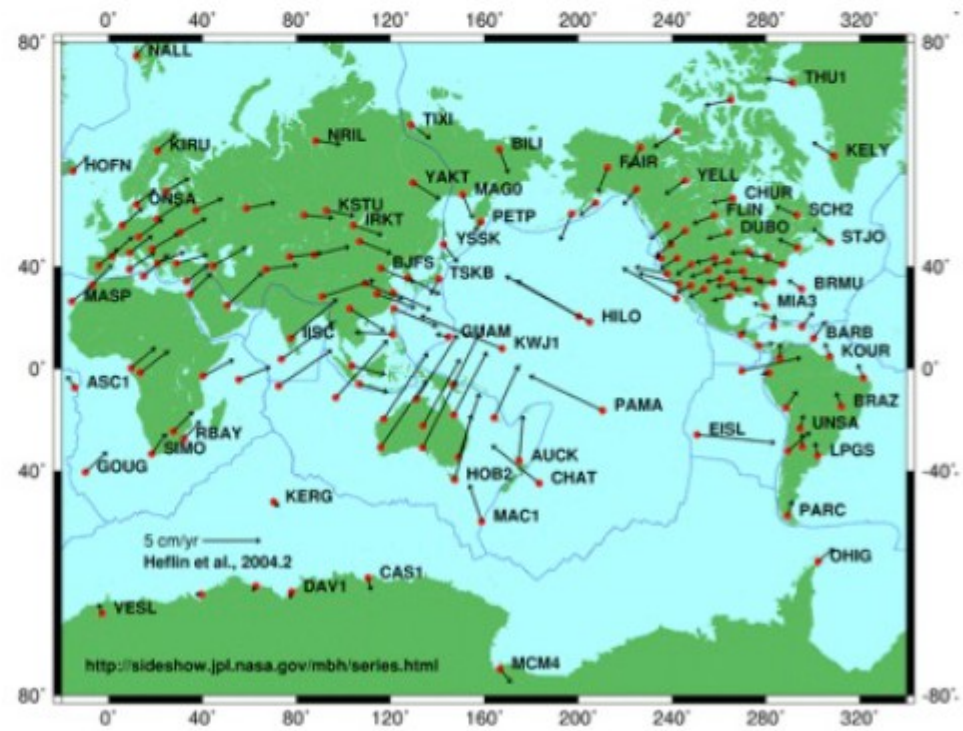
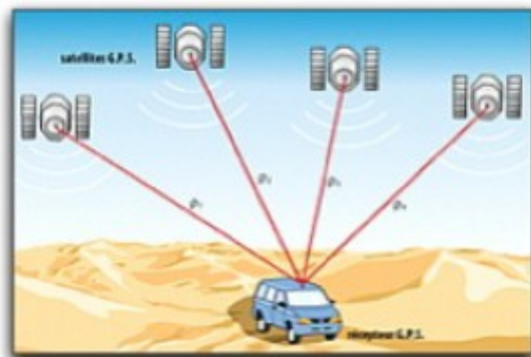
- Interférométrie à très longue base (VLBI) ;
résolution ~ 1 milliseconde d'arc)
- Suivi des sondes dans le système solaire par le
Deep Space Network (DSN)
- Datation des pulsars



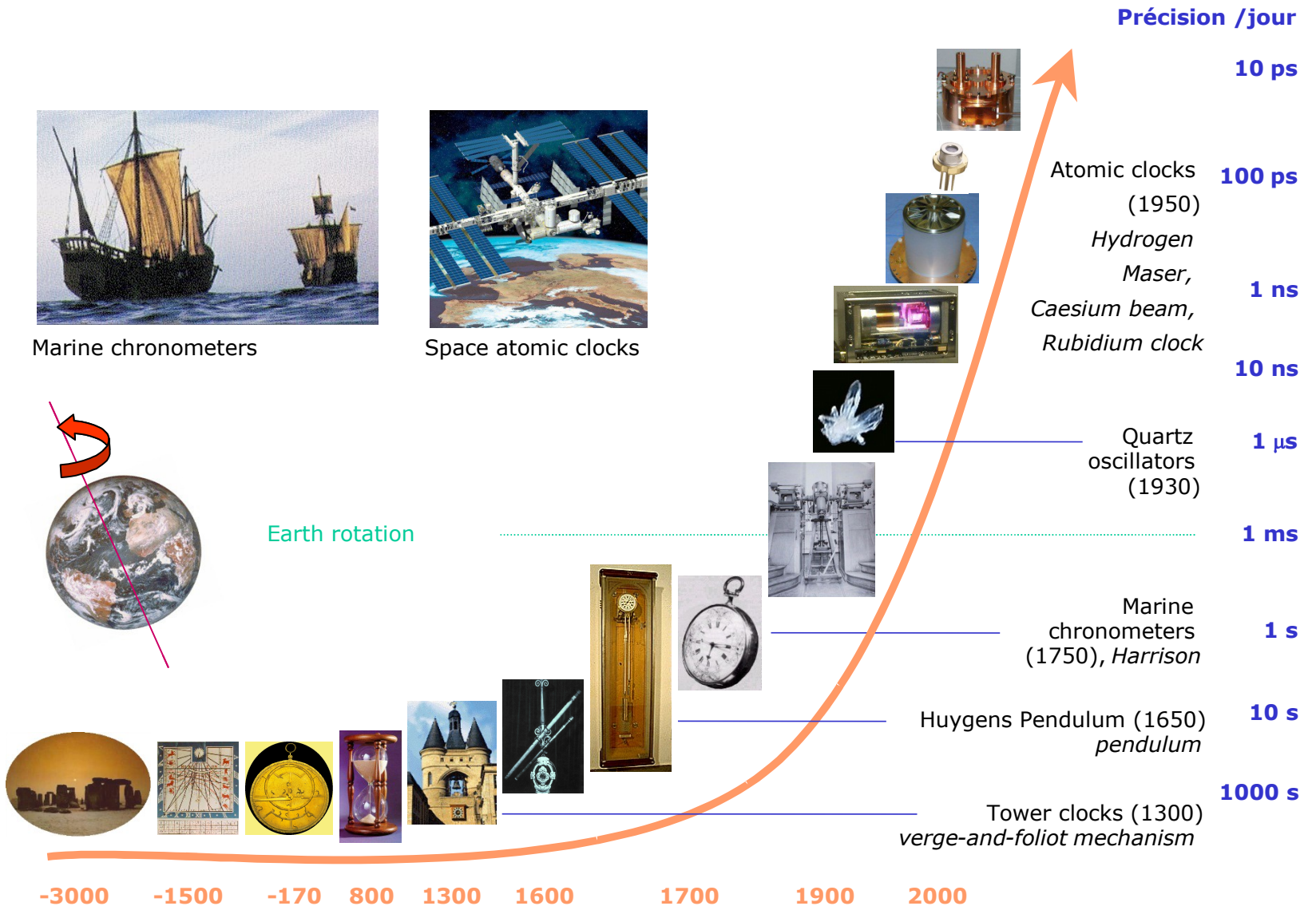
Positionnement par satellites

Positionnement par satellites (GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU, ...)

- Nombreuses applications : positionnement, navigation, atterrissage des avions, géophysique, ...



Evolution des horloges



MERCI !

