


# Petite histoire de la mesure (précise) du temps

***U3a Neuchâtel***

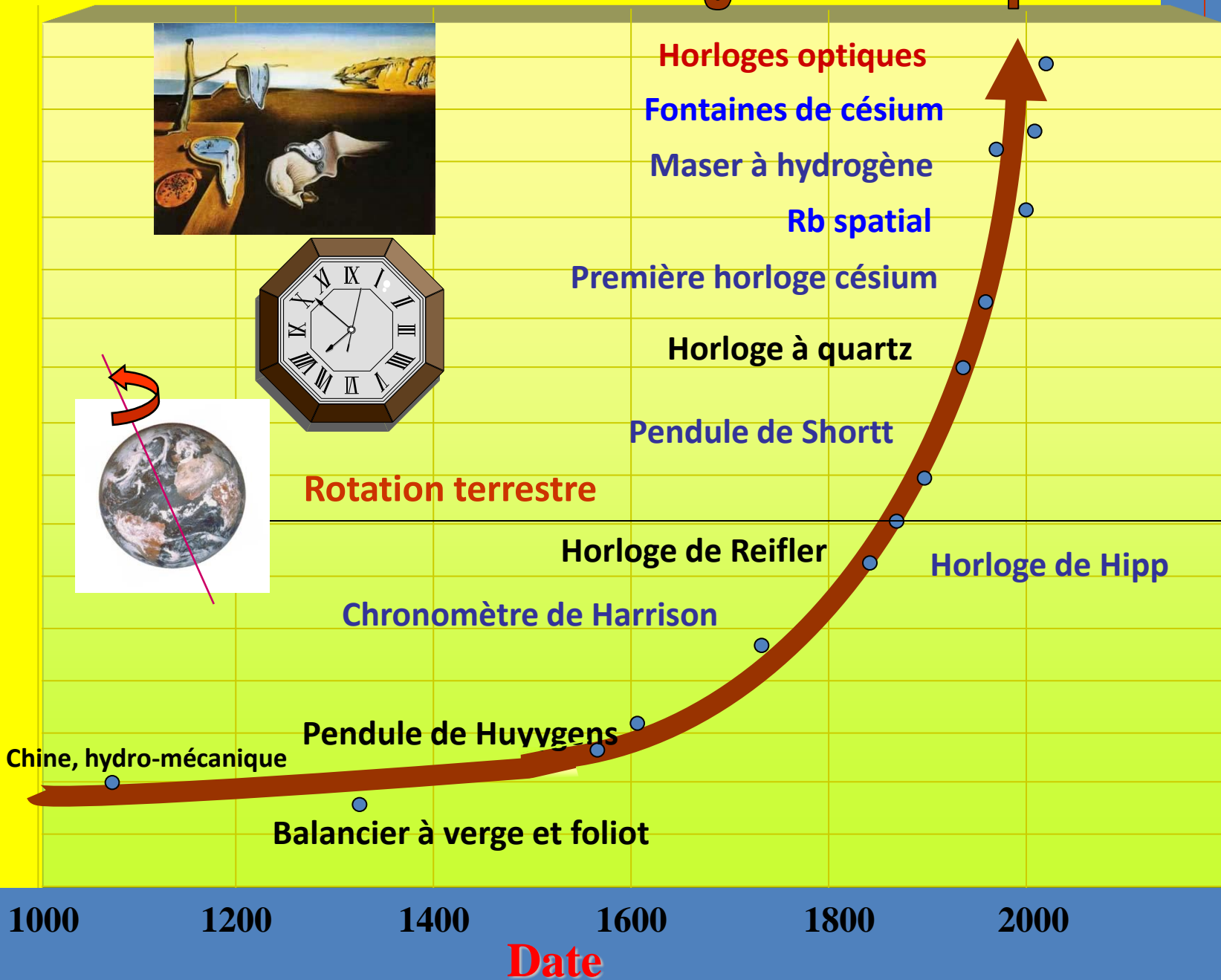
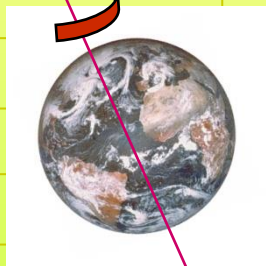
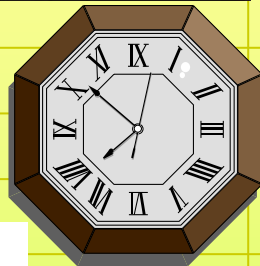
*Prof. Pierre Thomann, UniNE*

*Aula Jeunes Rives, Neuchâtel, 20 fév. 2018*

# Petite histoire de la mesure (précise) du temps

- Cycles astronomiques, calendriers
  - Rythmer la journée
    - Cadran solaire – équation du temps – clepsydre - sablier
  - Horloges mécaniques
    - Horloge à verge et foliot
    - Horloge à balancier premier oscillateur
    - Balancier gravitaire, balancier à ressort
    - Problèmes des longitudes: horloges de marine
    - Horloges astronomiques électriquement assistées
  - La révolution du quartz
  - Les horloges atomiques micro-onde
  - Les peignes de fréquence, les horloges atomiques optiques
  - Et après?
- 

# Evolution des gardes-temps



Incertitude de marche journalière

- 1 ps
- 100 ps
- 10 ns
- 1 μs
- 100 μs
- 10 ms
- 1 s
- 100 s
- 10 ks

Date

# Les origines: temps et astronomie la préhistoire

Stonehenge

3<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C.



Disque de Nebra

(Allemagne -1'600)




# Quelques cycles astronomiques

- Alternance jour-nuit
- Cycles de la lune
  - mois lunaire sidéral: 27.32166155... jours.
  - mois lunaire synodique: 29.530588853... jours
- Cycle des saisons solstices-équinoxes: année tropique 365.242198... jours solaires
- Cycle lunisolaire cycle de Meton Vème s. av. J.-C.:  
235 mois lunaires = 19 ans (+ 1h 27min)  
calendrier luni-solaire avec mois intercalaires
- Cycle de Saros ou cycle des éclipses (223 mois lunaires ou 18 ans 10 (11) jours et 8h

# Les calendriers

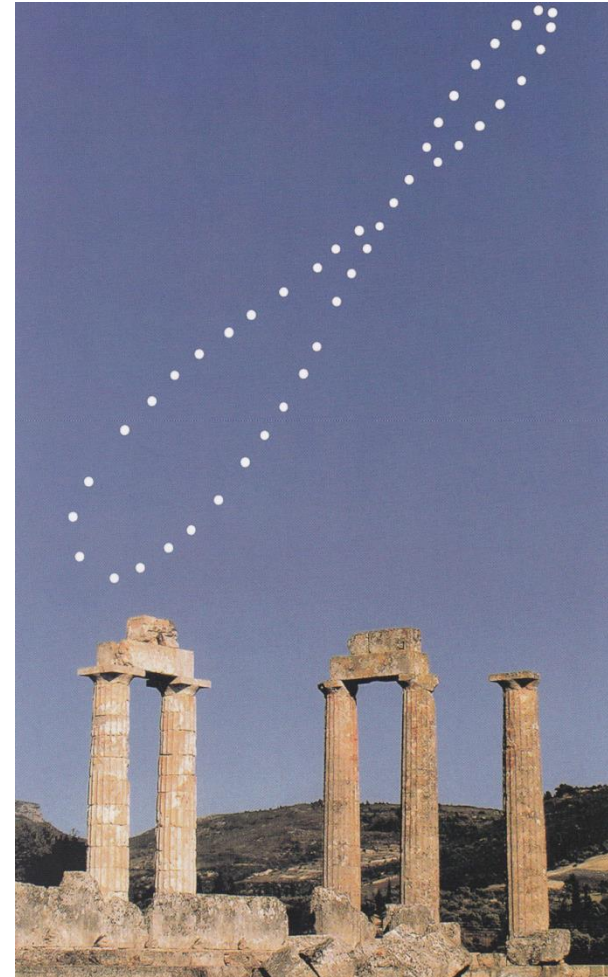
essais de résolution d'un casse-tête

- La construction d'un calendrier pratique est un casse-tête sans solution parfaite
  - Calendrier purement lunaire (hégirien, calendriers traditionnels juif et musulman). Le nouvel-an dérive de 11 jours par année
  - Calendrier luni-solaire (calendrier chinois traditionnel) avec 7 mois intercalaires répartis sur 19 ans)
  - Calendrier solaire (égyptien, grec, julien, grégorien)
- 

# Les calendriers solaires occidentaux

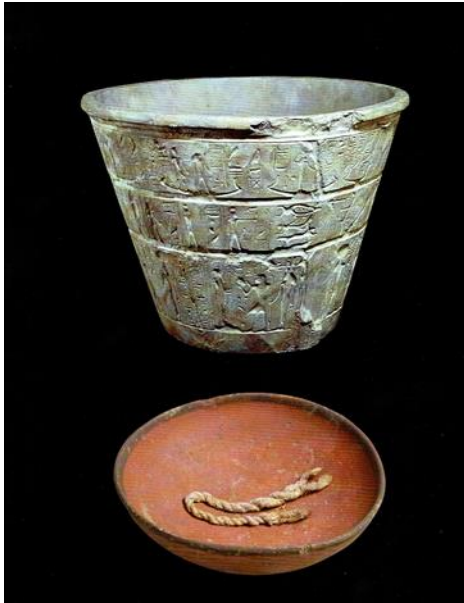
- Calendrier julien (Jules César) année de 365.2500 jours
- Calendrier grégorien (Pape Grégoire XIII, 1582, 4 octobre +1 = 15 octobre)
- Année de 365.2425 jours (3 années séculaires sur 4 ne sont pas bissextiles)
- Jours juliens: numérotation décimale des jours solaires depuis le lundi 1<sup>er</sup> janvier -4712 à 12 heures

# Rythmer la journée: le cadran solaire

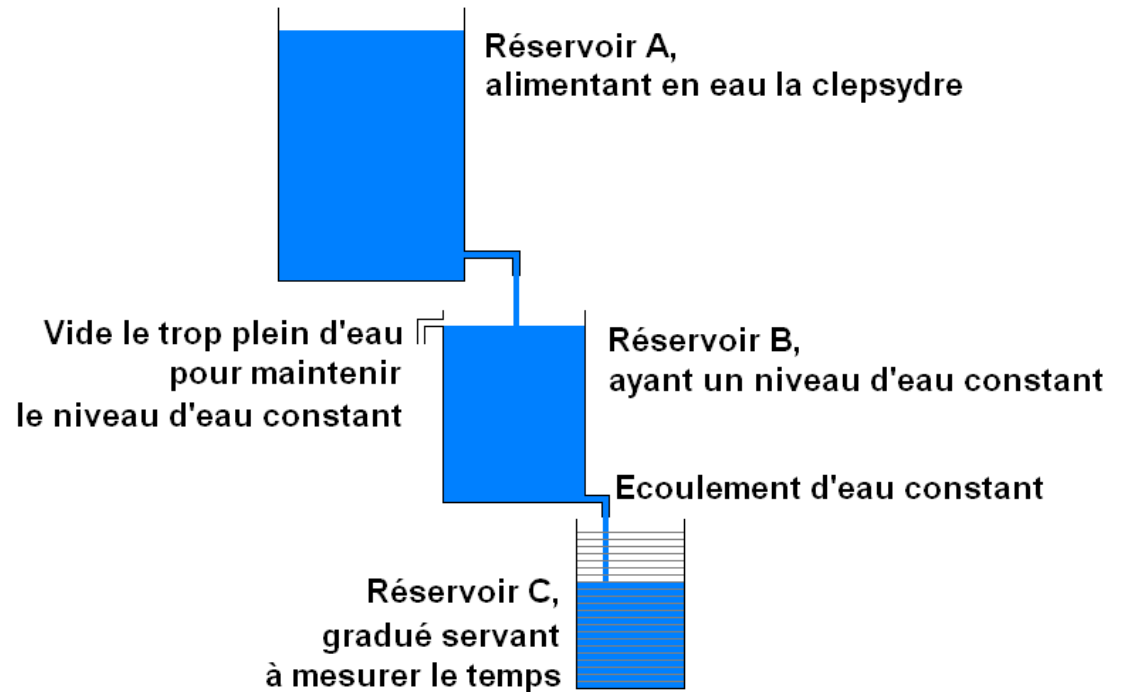




# Rythmer la journée: la clepsydre



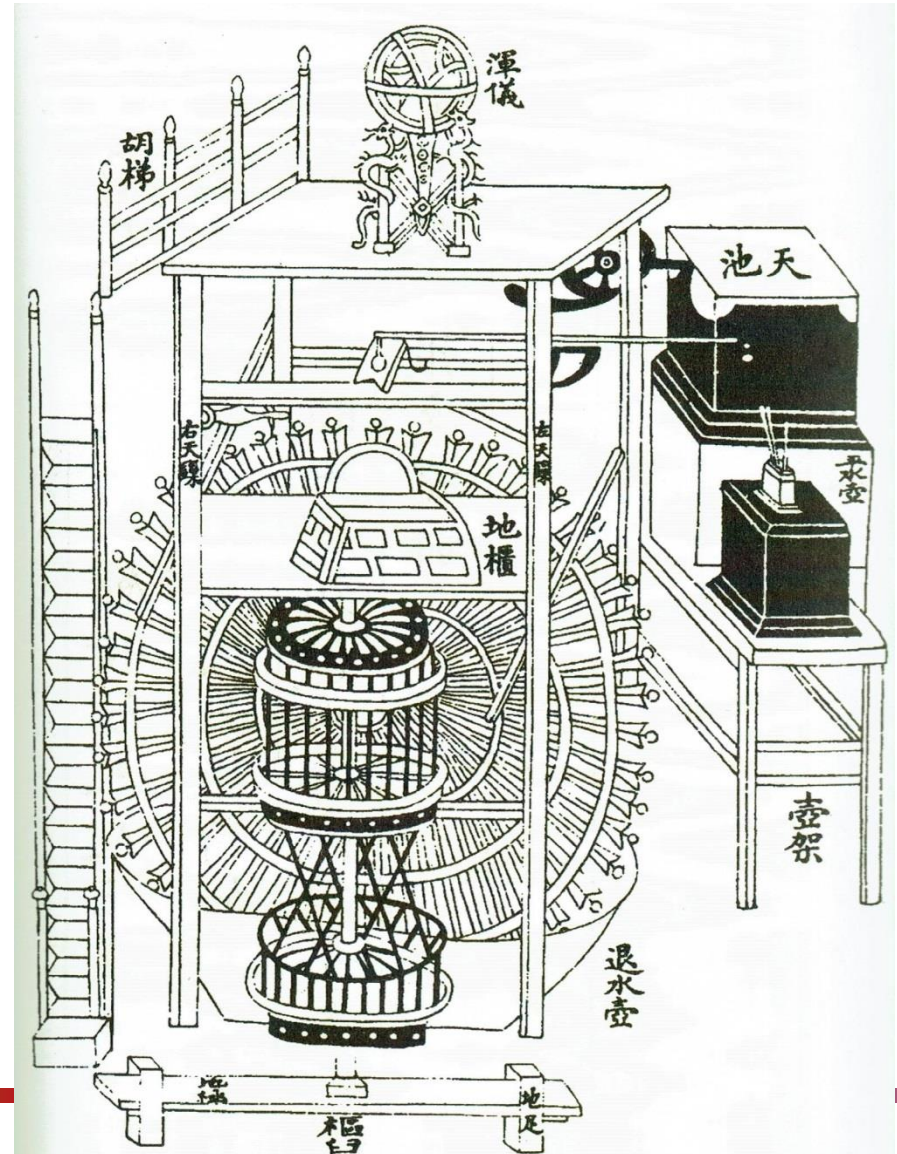
Clepsydre de Karnak  
Egypte, -1400



Clepsydre à débit constant  
(Ctésibios, III<sup>ème</sup> siècle avant J.-C.)

# Rythmer la journée: la clepsydre

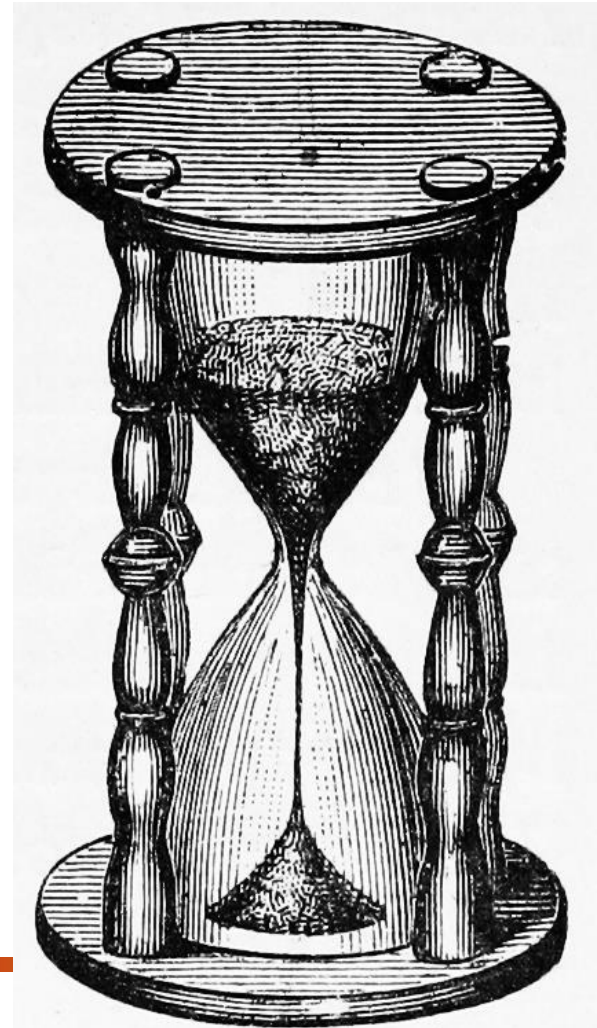
Horloge astronomique  
de Su Song (1086)  
Actionnée par  
une clepsydre



# Rythmer la journée: le sablier

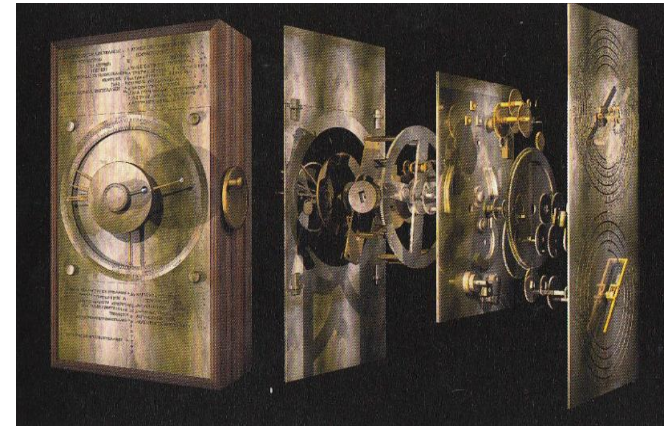
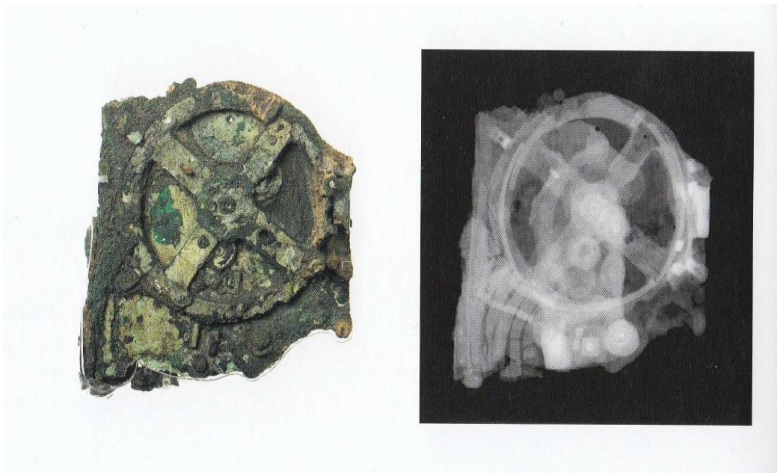
Apparition en Occident:  
XII<sup>ème</sup> siècle

Utilisé très largement pour mesurer des intervalles de temps de quelques minutes à quelques heures (temps de parole, quarts de marine)



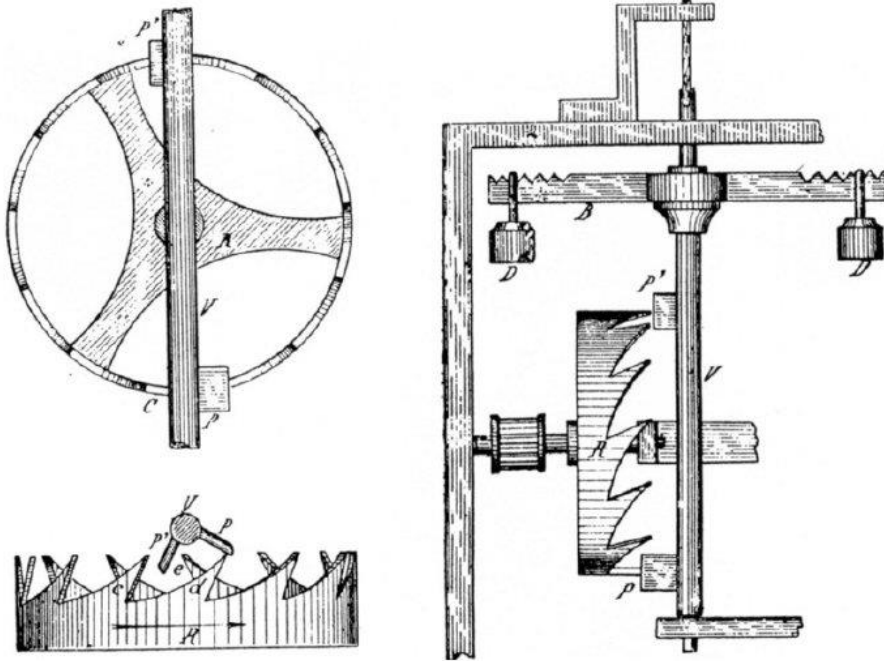
# Les horloges mécaniques

- Premiers engrenages connus: machine d'Anticythère
- II ème siècle avant J.-C, découverte en 1901
- 32 roues dentées, 2000 caractères, horloge astronomique, calendrier éclipses, calendrier olympique



# Les horloges mécaniques verge et foliot 1400-1600

- Foliot: premier régulateur mécanique



# Les horloges mécaniques

## Verge et foliot 1400-1600



verge\_et\_foliot.m4v

# Les horloges mécaniques

## Verge et foliot

- Défaut du régulateur à foliot: le temps de l'aller et retour dépend beaucoup de la force d'entraînement de la roue d'échappement.
- L'énergie nécessaire à entretenir le mouvement est élevée (beaucoup de frottement)
- Les horloges d'église déviaient de 30 minutes par jour...

# Les horloges mécaniques

## Le pendule comme organe réglant

- Léonard de Vinci (1452-1519) 1<sup>ère</sup> idée
- Pas décrite, pas réalisée

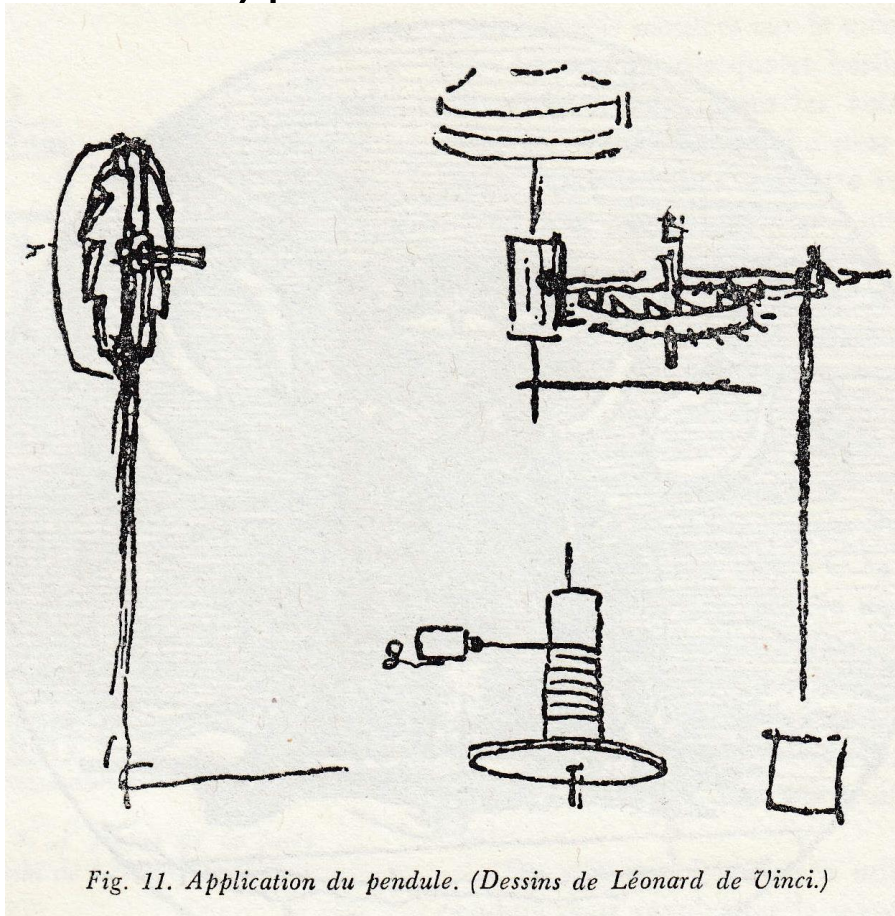


Fig. 11. Application du pendule. (Dessins de Léonard de Vinci.)



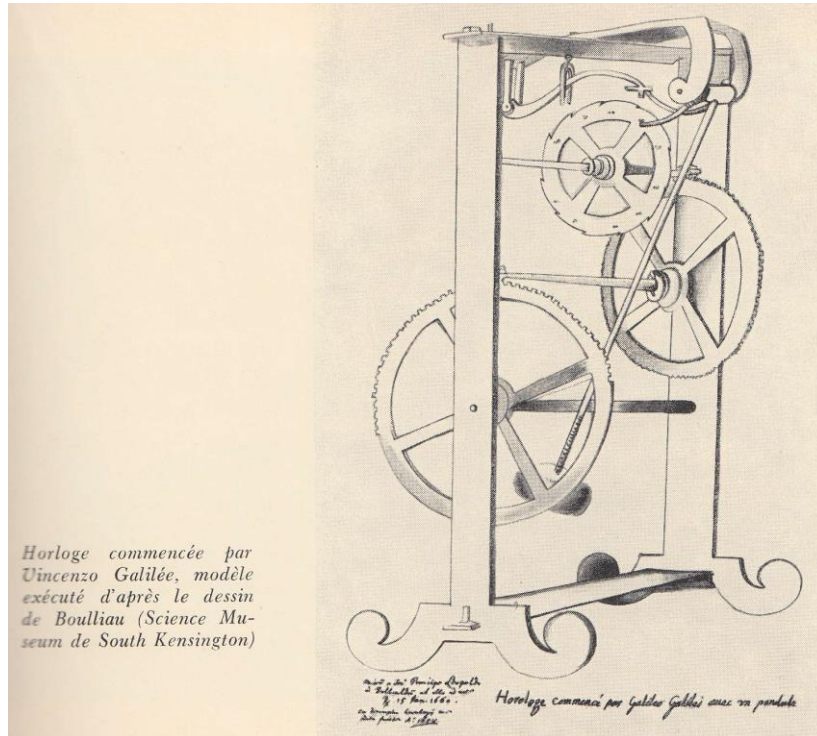
# Les horloges mécaniques

## Le pendule comme organe réglant

- 1602: Galilée constate l'isochronisme des oscillations d'un pendule (erreur! mais très faible si les oscillations sont de faible amplitude)
- **1637** Galilée propose d'utiliser le pendule pour réguler une horloge. «*Misuratore di tempo*»  
Comptage pendant un jour pour calibrer la longueur...
- Problème: frottement, amortissement des oscillations. Galilée conçoit un échappement mais, aveugle, meurt avant de l'avoir réalisé. Son fils n'achève pas la réalisation, mais le dessin inspirera Huygens

# Les horloges mécaniques

## Le pendule comme organe réglant



Misuratore di tempo  
de Galilée

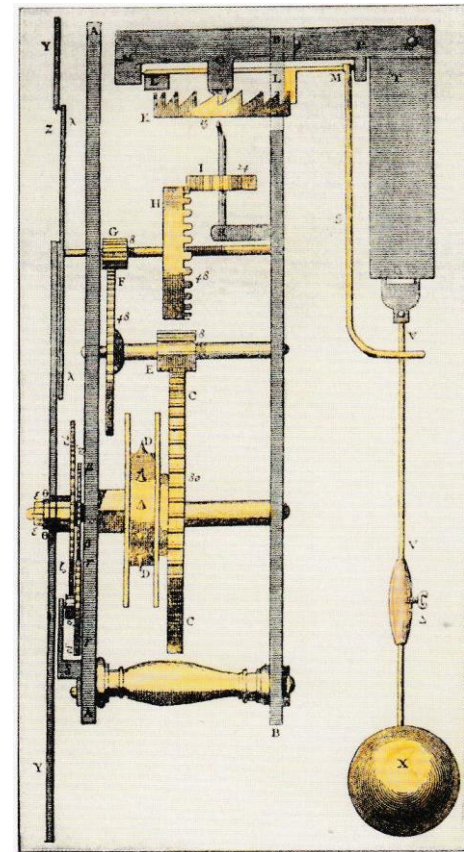
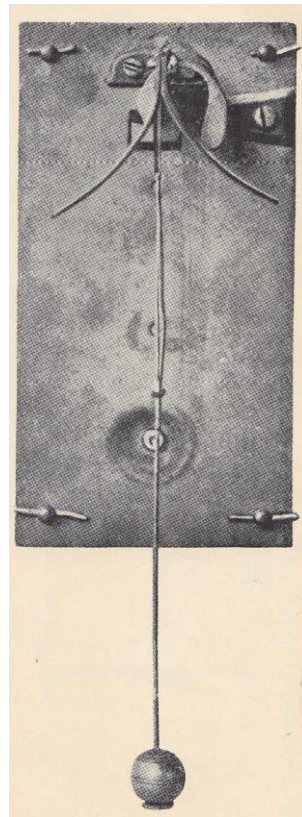
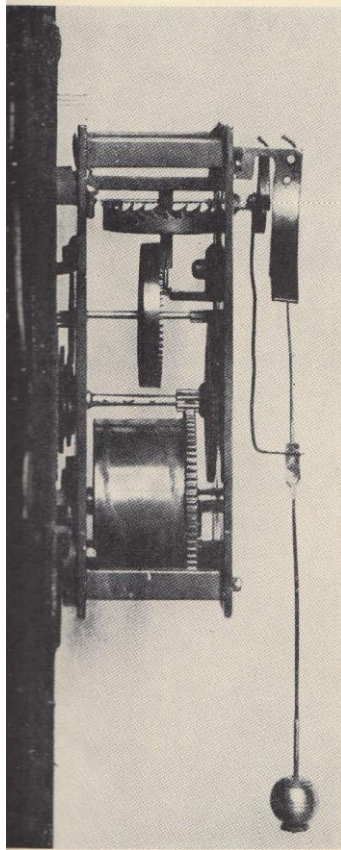
(croquis de son  
biographe) env 1640

# Les horloges mécaniques

## Le pendule comme organe réglant

- 1657: Huygens – Coster
- 1<sup>ère</sup> horloge à pendule

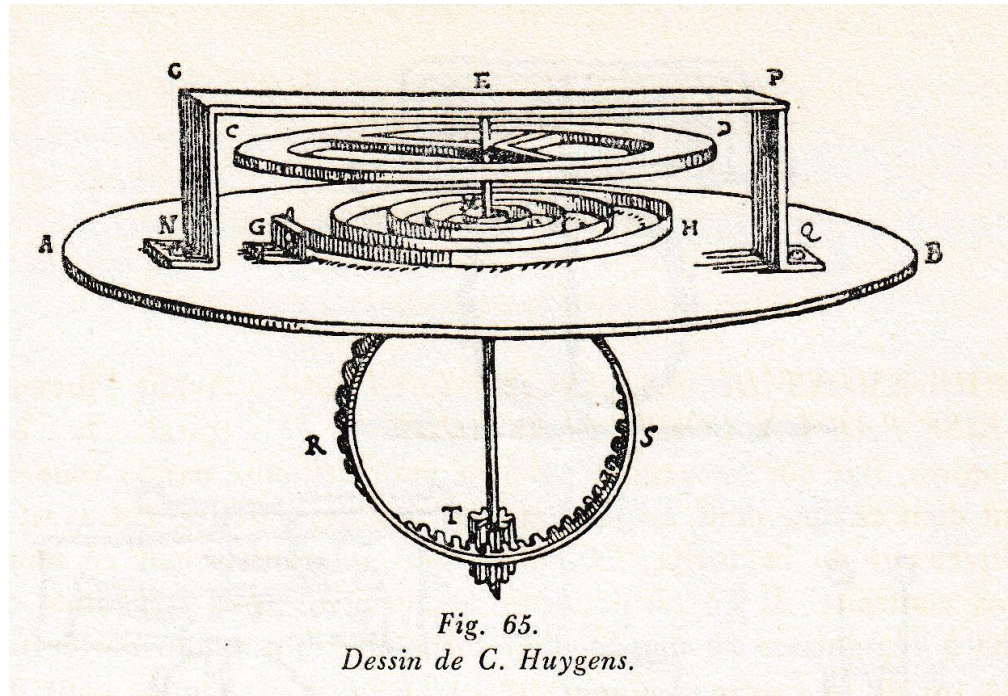
1673: Huygens  
2<sup>ème</sup> horloge



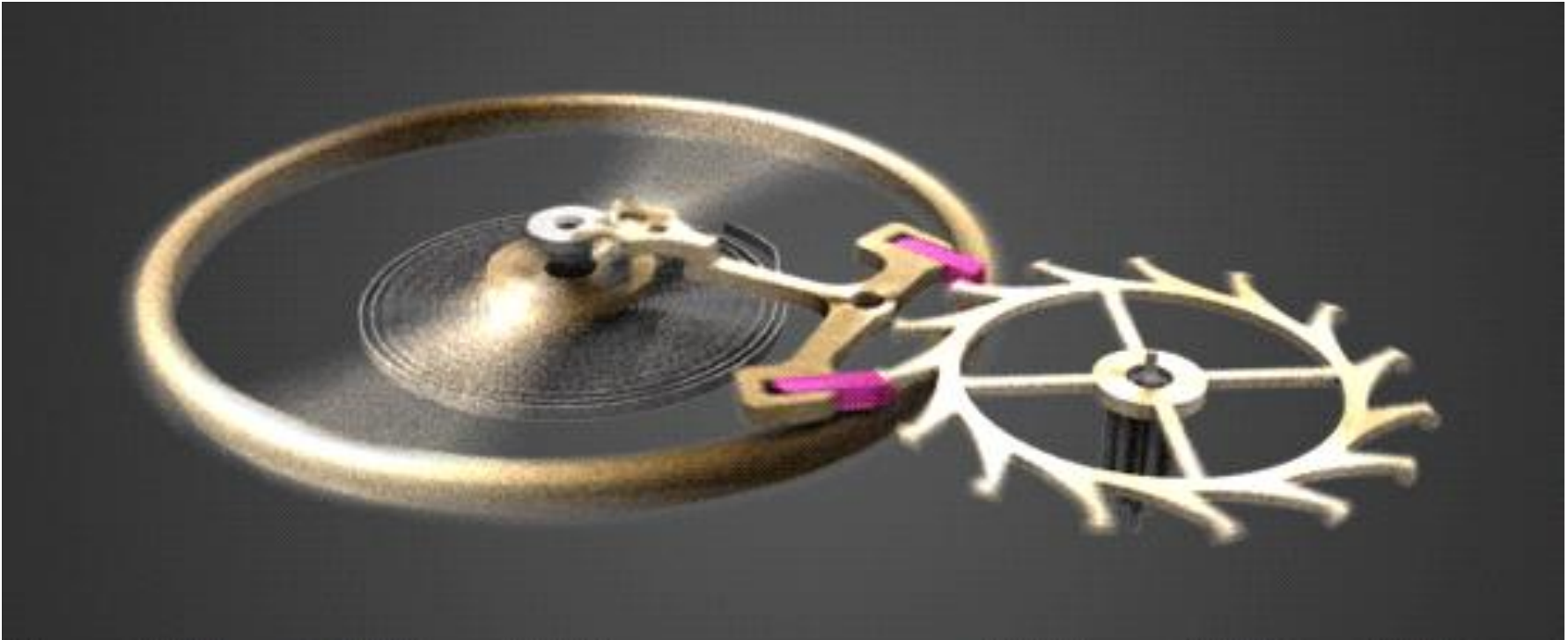
# Les horloges mécaniques

le *balancier à ressort* comme organe réglant

- 1630-61\_Hooke (et d'autres) introduit le balancier à ressort
- 1675: Huygens introduit le balancier spiral



# Echappement à ancre

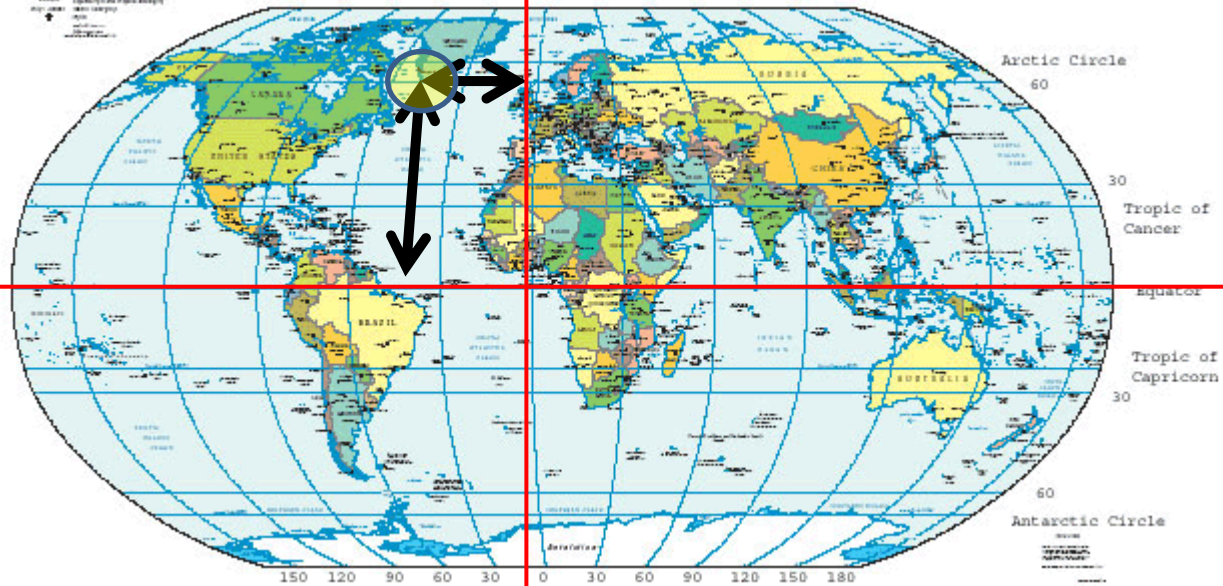


2017\_1027\_balancier\_spiral\_et\_échappement\_f5V5kAc.gif - Raccourci.lnk

# La navigation maritime horloges de marine

Méridien de Greenwich, longitude 0°

Political Map of the World, June 2003



Équateur  
Latitude 0°



Latitude 60° N



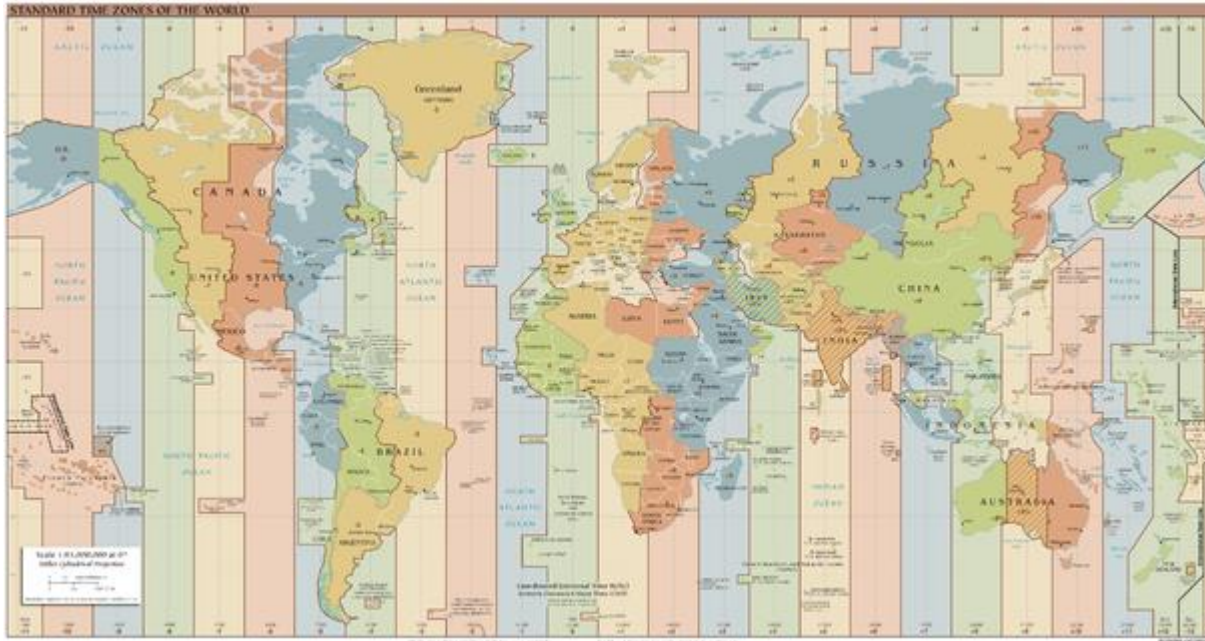
Longitude 30° O

# La navigation maritime: latitude

- Détermination de la latitude:
  - Mesurer la hauteur de l'étoile polaire au-dessus de l'horizon,
  - d'autres étoiles connues font l'affaire, en particulier dans l'hémisphère sud

Problème maîtrisé depuis les débuts de la navigation

# Navigation maritime: relation entre temps et longitude



**Espace:** Tour de la Terre à l'équateur:

360° ou 40'000 km: **1° = 111 km**

**Temps:** 360° en 24h: 15° = 1h ou **1° = 4 minutes**



# Le problème des longitudes

- Déterminer de la longitude revient à déterminer la différence entre **l'heure solaire de Greenwich** (ou l'heure au port de départ) et **l'heure solaire locale**
- **Si la différence est 1h, la longitude est 15° O**
- **Si on veut connaître sa longitude à 1° près, il faut connaître l'heure du port de départ à 4 minutes près**

# Le problème des longitudes

Pour connaître l'heure de Greenwich quand on n'y est pas, il faut une horloge, par exemple:

- La Lune (précision requise  $2' / ^\circ$  de longitude)
- Observation des satellites de Jupiter
- Horloge mécanique emportée à bord:  
**le chronomètre de marine**

# Le problème des longitudes

Petite chronologie des premiers chronomètres de marine

1660-1679: Tentative de Huygens, résultats médiocres

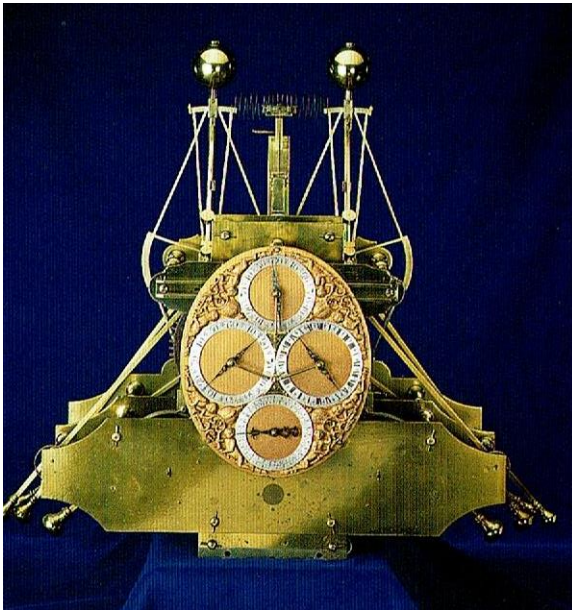
1693: Naissance de John Harrison

1707: 2000 marins anglais perdus dans un naufrage

1714: Loi sur les longitudes du Parlement anglais promet 20'000 livres à qui construira une horloge permettant de déterminer la longitude à mieux que  $0.5^\circ$  près, démonstration par un voyage aux «Indes occidentales» (Antilles)

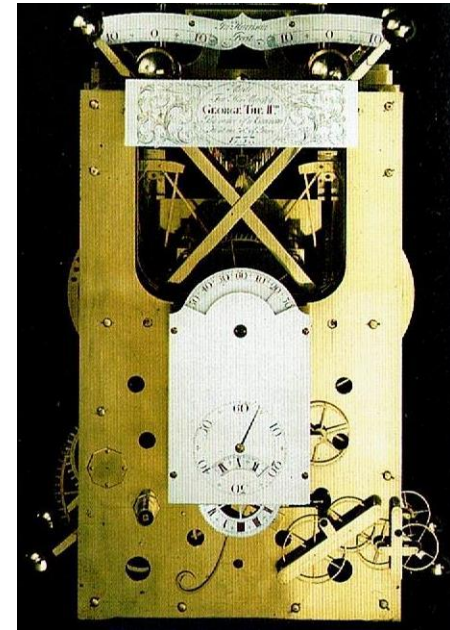
# Le problème des longitudes

Petite chronologie des premiers chronomètres de marine



Harrison H1 1730-5 haut env 1m

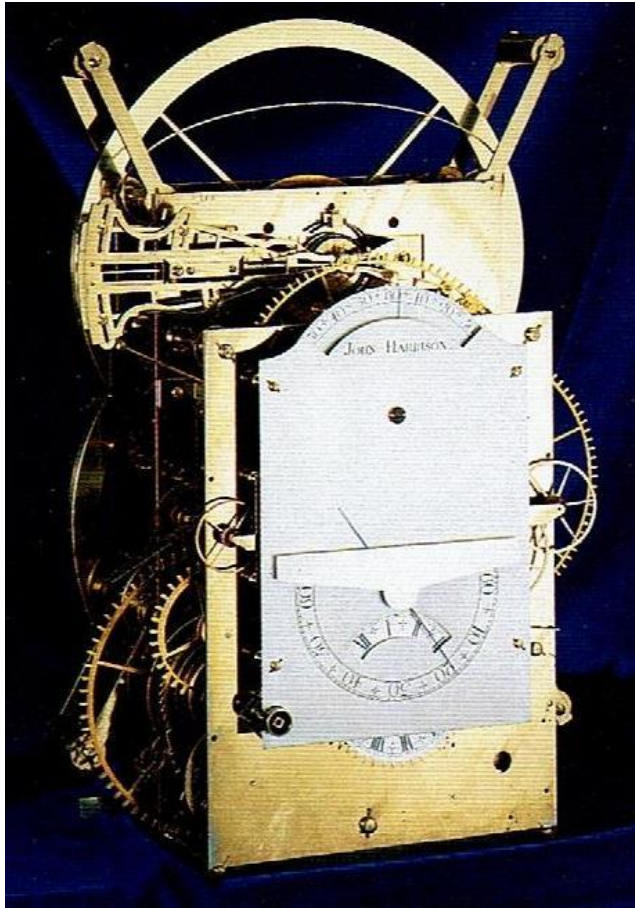
Compensation thermique originale  
Engrenages en bois



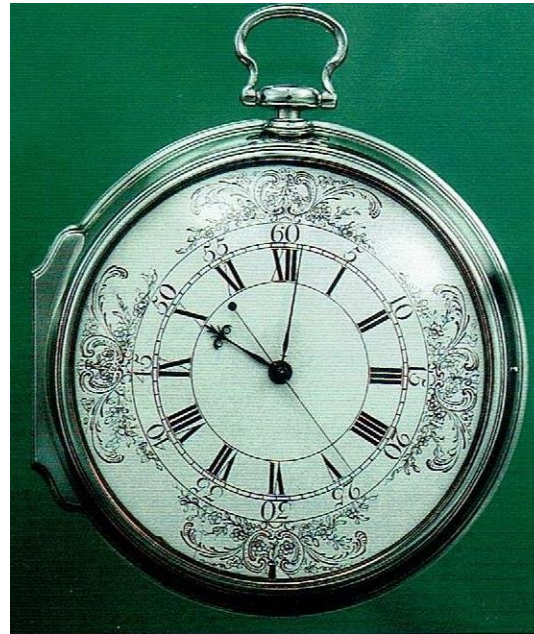
Harrison H2 1737-9

# Le problème des longitudes

Petite chronologie des premiers chronomètres de marine



Harrison\_H3\_1740-1759




Harrison\_H4\_1755-1759 Diamètre 13 cm

1749 Médaille Copley de la Royal Society



# Le problème des longitudes

Petite chronologie des premiers chronomètres de marine

- Nov 1761 – mars 1762 H3 et H4 testés
  - Angleterre-Jamaïque et retour
  - 1764 Angleterre - Barbade et retour avec H4
  - Succès total (16km d'erreur pour 55km requis)  
mais paiement partiel et changement de règles...
  - 1773 Paiement final...3 ans avant la mort de Harrison
- 

# Le problème des longitudes

Petite chronologie des premiers chronomètres de marine

- Autres horlogers : Arnold, Kendall (UK), Ferdinand Berthoud (CH-F),...

# De la mécanique à l'électro-mécanique

- Les progrès se concentrent sur
  - Minimisation des frottements
  - Impulsion de l'échappement sur le balancier concentrée au passage du point mort
- Meilleure horloge purement mécanique: Riefler (1889)  
10 ms/jour
- Pendules mécaniques «aidées» par l'électricité Hipp (1883):  
0.5s / an, 0.05 s / jour





# De la mécanique à l'électro-mécanique

## Pendule de Shortt (1921)

$Q = 25'000$  à l'air

$Q = 100'000$  sous vide

Le pendule maître est  
«relancé» par une  
impulsion /30s



# De la mécanique à l'électro-mécanique

- Pendule de Shortt (1921): 0.2ms/j, 0.1s/an
- Rotation terrestre: +-2ms/j, +-1s/an
- Le pendule de Shortt est 10 fois plus stable que la rotation terrestre!
  
- Importance du facteur de qualité  
pointe vers la génération suivante:  
Le résonateur à quartz

# Oscillateurs électro-mécaniques

Quartz



$Q=1'000'000$

# Résonateurs à quartz

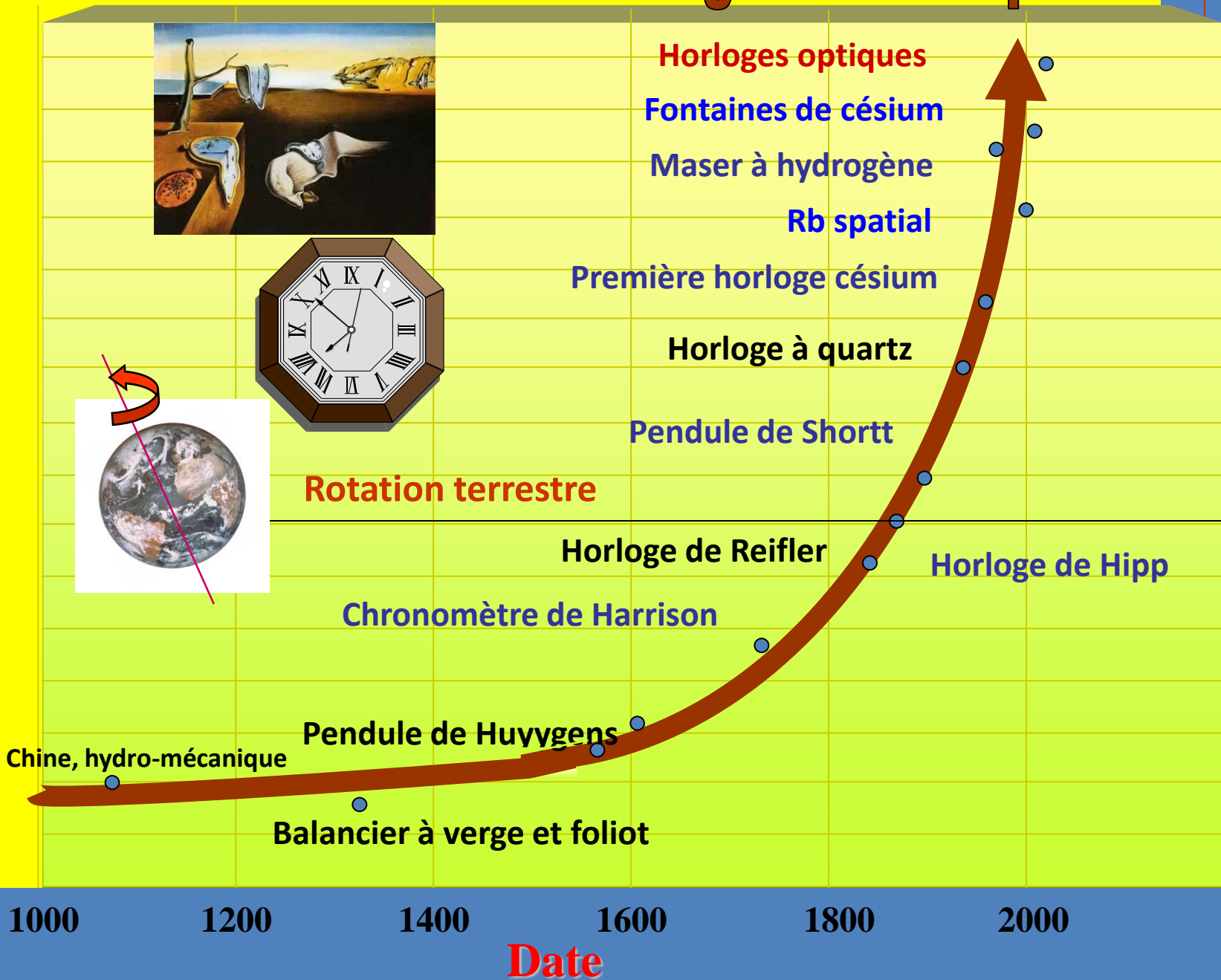
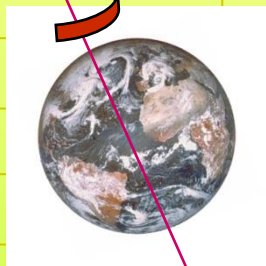
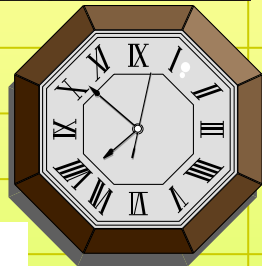


Quartz  
«horloger»

Quartz  
«horloge»

|                 |                             |                             |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Q               | 10'000                      | 1'000'000                   |
| fréquence       | 32kHz                       | 10MHz                       |
| Température:    | 1s/jour (10°C)              | 0.1s/an (10°C)              |
| Vieillessement: | $5 \cdot 10^{-7}/\text{an}$ | $5 \cdot 10^{-8}/\text{an}$ |

# Evolution des gardes-temps



Incertitude de marche journalière

- 1 ps
- 100 ps
- 10 ns
- 1 μs
- 100 μs
- 10 ms
- 1 s
- 100 s
- 10 ks

Date

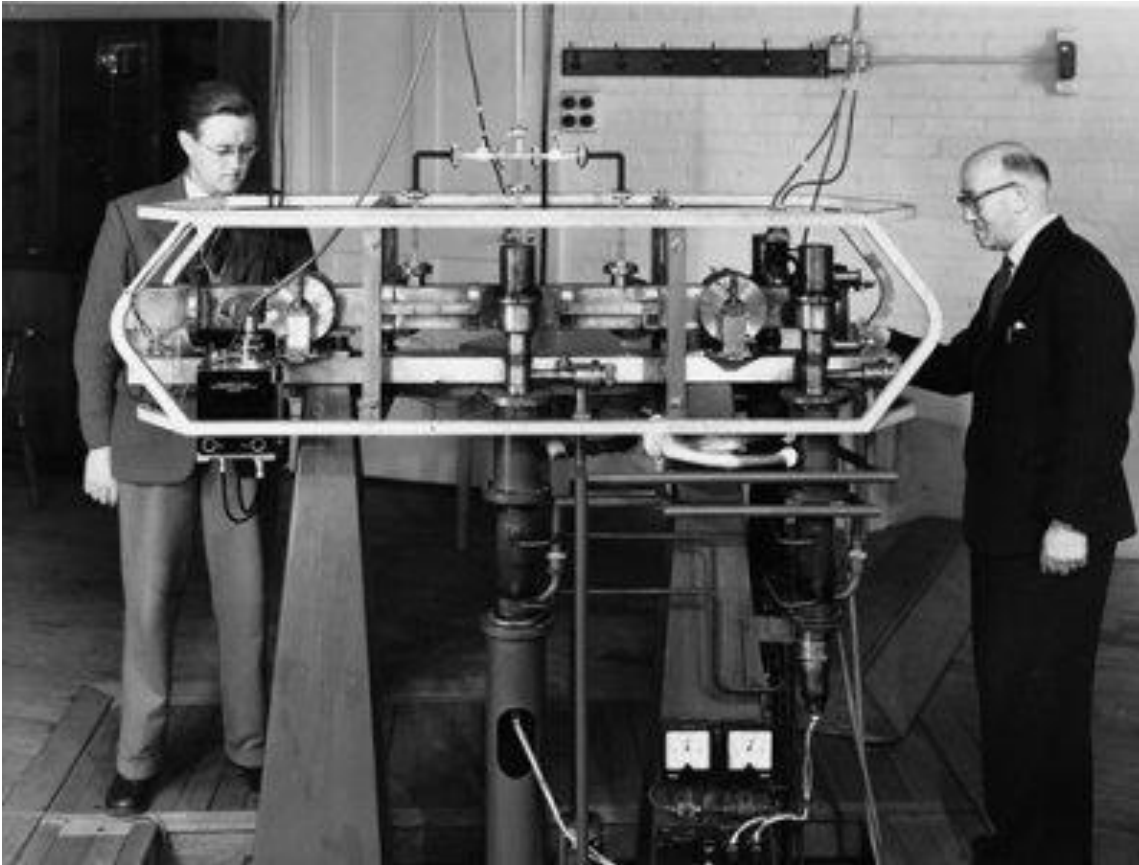
# L'atome comme résonateur

**« ...Si, donc, nous désirons des étalons de temps qui soient absolument permanents, nous devons les chercher non pas dans le mouvement de notre planète, mais bien dans la période de vibration de ces molécules impérissables, inaltérables et parfaitement identiques »**

**(James Clerk Maxwell, 1870)**



# 1ère horloge atomique au césium Essen et Parry 1955 UK



$$Q = 10^8$$

10 $\mu$ s/an

100ns/j

10'000x plus stable que la rotation terrestre

**La *seconde* est la durée de**

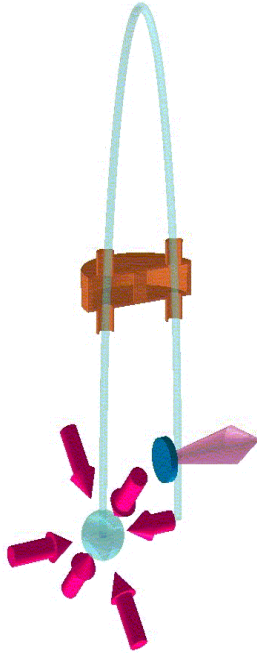
**9'192'631'770 périodes**

**de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental du césium 133**

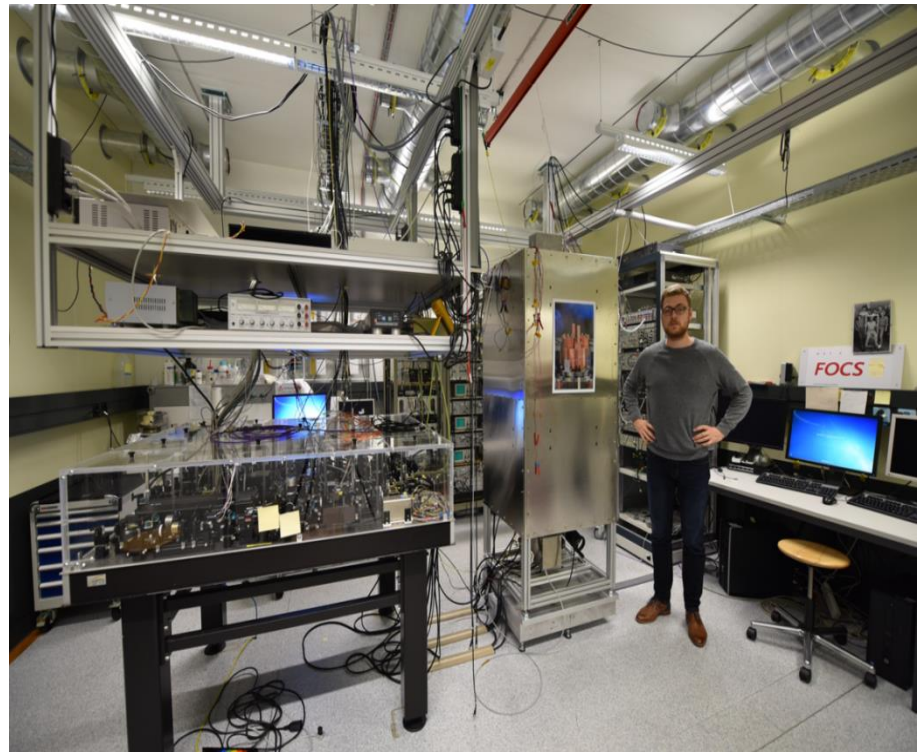
**(13ème Conférence Générale des Poids et Mesures, 1967)**



*De l'idée...*



*...à la réalisation*



FOCS-2 étalon primaire suisse à METAS, inexactitude de  $2 \cdot 10^{-15}$ , prêt à contribuer au pilotage de TAI, le temps atomique international

Que veut dire «inexactitude  $10^{-15}$  » ?

Deux horloges de cette inexactitude mesureraient un intervalle de temps de

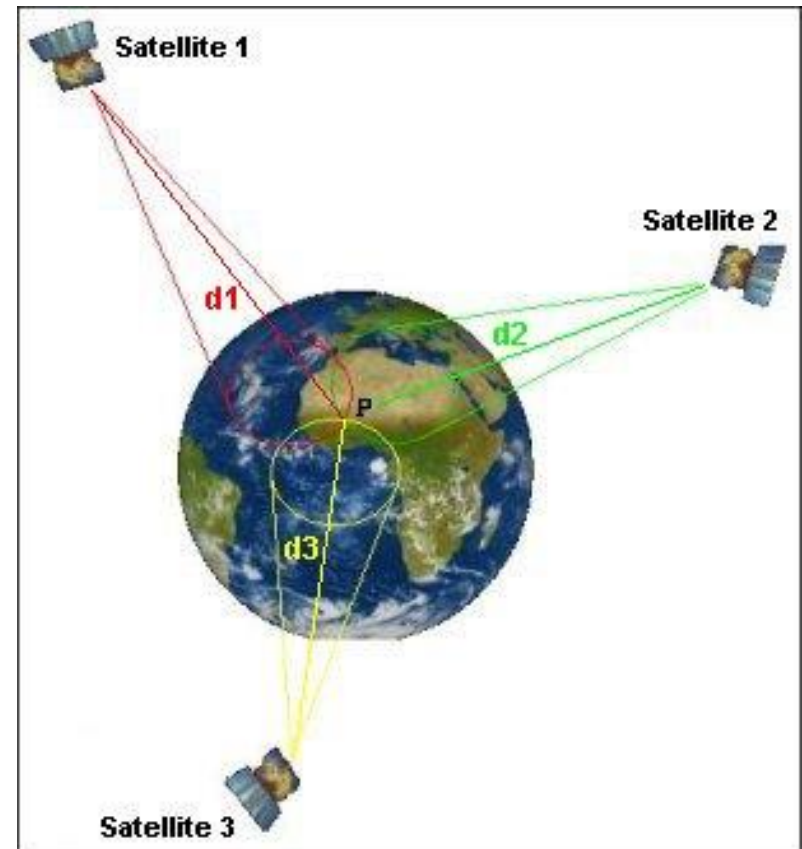
- 30'000'000 années avec une différence inférieure à une seconde, ou de
- 1 année avec une différence inférieure à 30 nanosecondes

*sans calibration préalable*

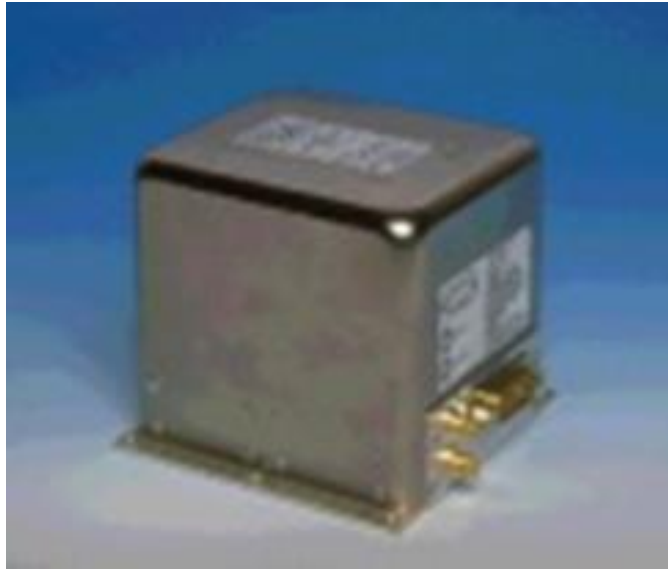
# Navigation et positionnement par satellites (GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDU)

A la vitesse de la lumière,  
1 seconde = 300'000km ou:  
1 nanoseconde = 30 cm

Synchronisation nécessaire  
entre les 30 satellites: 1ns



# Horloges atomiques neuchâtoises dans les satellites GALILEO



Horloge Rb  
Spectratime  
(Giove-A)



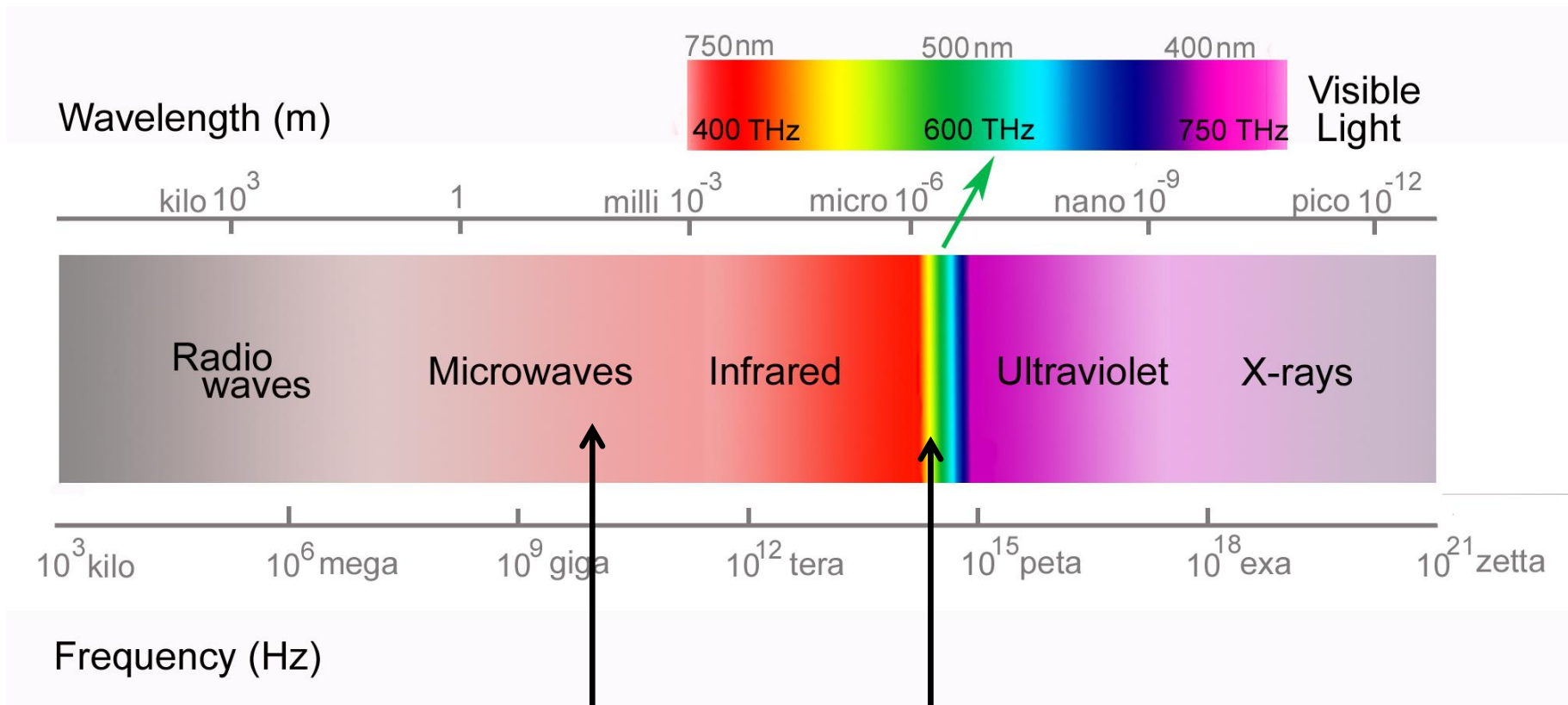
Horloge H  
Spectratime  
(Giove-B)

# Et après? Les horloges «optiques»

Les atomes présentent des résonances à des fréquences bien supérieures aux fréquences micro-onde (10GHz ou  $10^{10}$  Hz): les fréquences optiques ( $10^{15}$  Hz), mais difficiles à mesurer

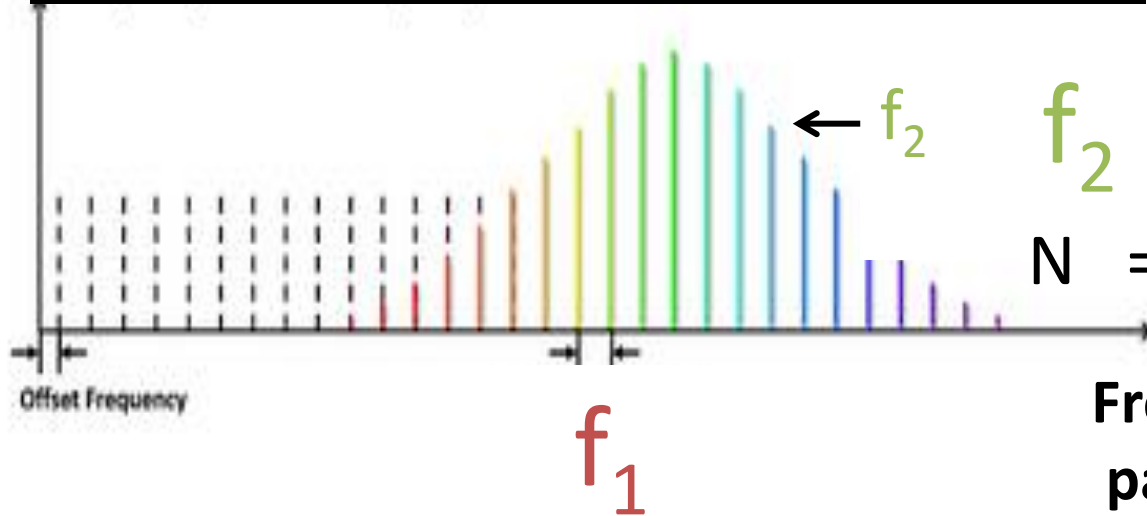
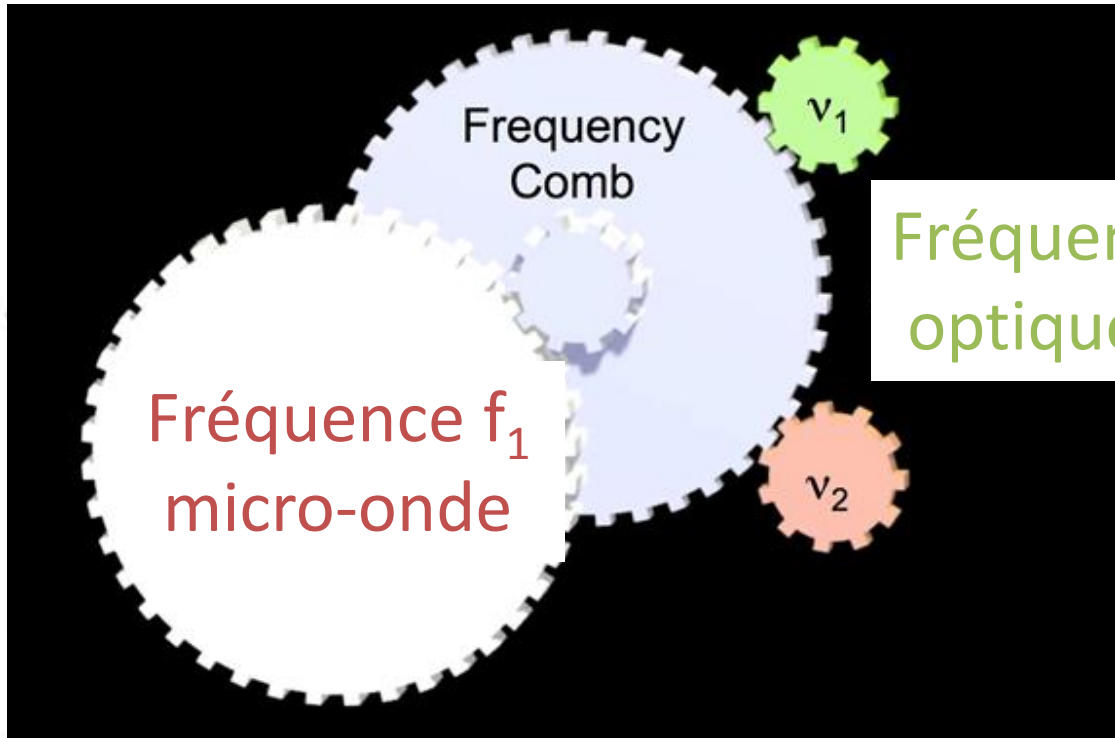
1939-45: le développement du radar donne accès aux fréquences micro-onde

2000 Peigne de fréquence optique: donne accès au comptage des fréquences optiques



**Césium**  
(Micro-ondes)

**Strontium**  
(Fréquence optique, lumière visible)



$$f_2 = N f_1$$

$$N = 70'000 - 150'000$$

Fréquences émises  
par le laser

# Horloges optiques

- Horloges optiques actuelles basées sur:
- Hg, Hg<sup>+</sup>, Al<sup>+</sup>, Sr, Yb, Ca, ...
- Inexactitude (et instabilité):  $10^{-17}$
- Correspond à une seconde par rapport à l'âge de l'univers





# Perspectives

- Pas de ralentissement en vue ( $10^{-43}$ s). Au-delà des horloges optiques atomiques, les horloges optiques nucléaires (Th 229), à des fréquences toujours plus élevées (UV)
- Redéfinition de la seconde?
- Tests de physique fondamentale
  - Dérive des constantes fondamentales
  - Pistes pour la «grande unification»
  - Savoir, enfin, ce qu'est le temps...

Merci de votre attention!

















