

# Histoire de la mesure du temps - Les Horloges -

José Busto

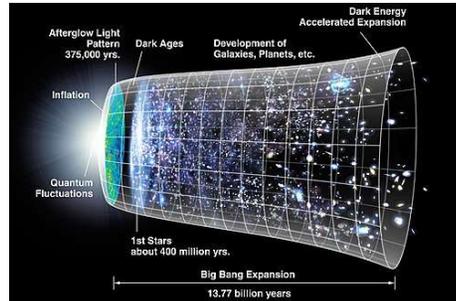
CPPM

Université Aix-Marseille

*UTL – 7 Novembre 2025*

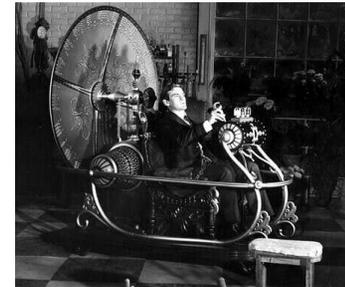
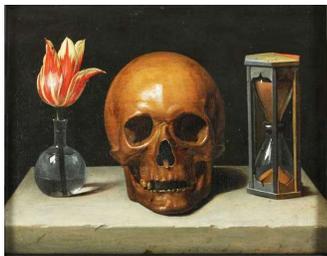
nous fascine,

# Le temps



nous obsède

nous inquiète et terrifie.

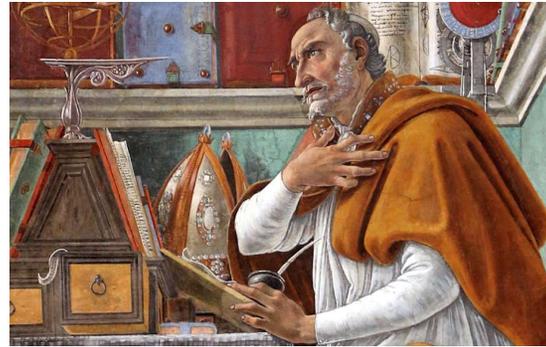


mais qu'est-ce que le temps ?

Le temps a été étudié, « de tous temps », par les plus grands philosophes et scientifiques



Heraclite  
(~500 av J-C)  
Panta rhei



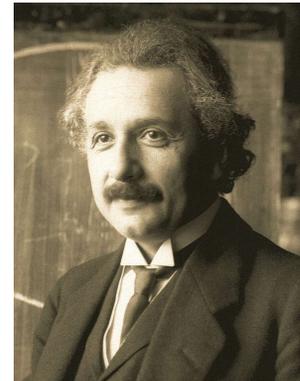
Saint Agustin  
(IV<sup>ème</sup> siècle)

« Qu'est-ce donc que le temps ?  
Quand personne ne me le  
demande, je le sais ; dès qu'il  
s'agit de l'exprimer, je ne le sais  
plus »



Newton  
17<sup>ème</sup> siècle

« Le temps absolu, vrai et  
mathématique, sans  
relation à rien d'extérieur,  
coule uniformément, et  
s'appelle la durée. .... »

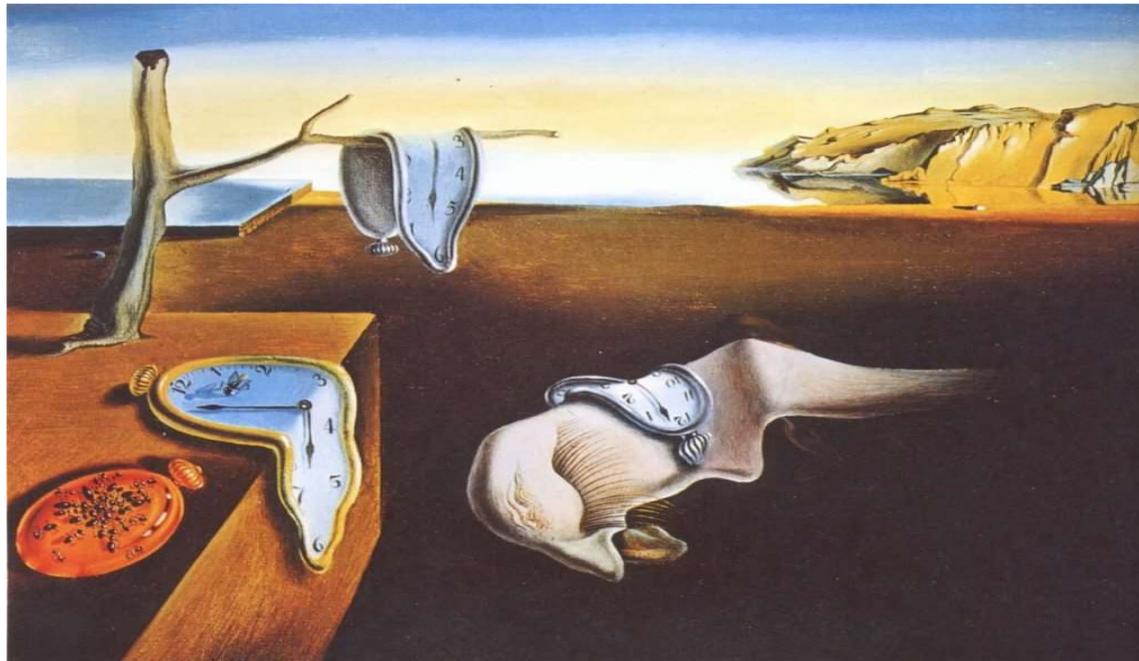


Einstein  
20<sup>ème</sup> siècle

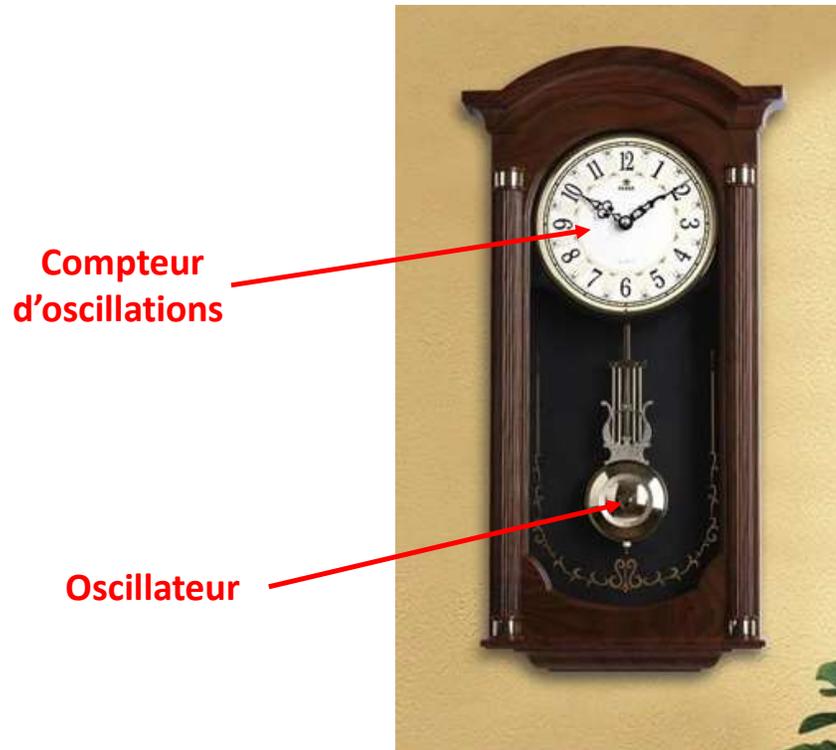
« Le temps n'existe pas – nous  
l'avons inventé. Le temps est ce  
que dit l'horloge. La distinction  
entre passé, présent et futur  
n'est qu'une illusion tenace.»

Le temps est une notion très riche et complexe.

Nous allons nous limiter à étudier la manière dont l'Homme est capable de mettre en évidence son écoulement par l'expérimentation.

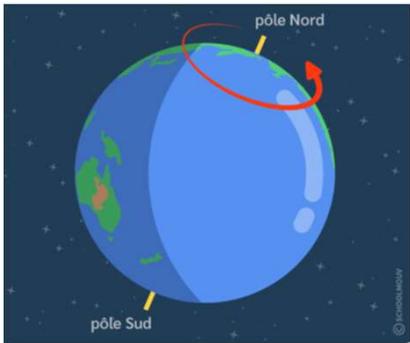
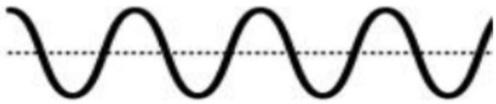


# Qu'est ce qu'une horloge ?

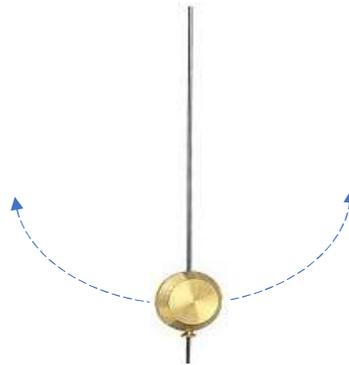
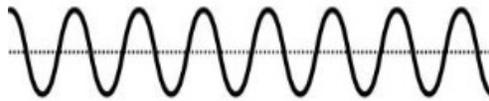


Horloge = Oscillateur + Compteur d'oscillations

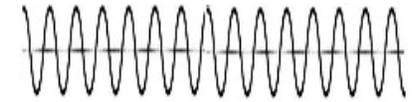
## Quelques « oscillateurs » utilisés pour la « mesure » du temps



Un tour en 24 h



0.5 oscillations en 1 s  
(pendule d'un mètre)



32786 oscillations en 1 s

*Oscillateur de fréquence propre déterminée*

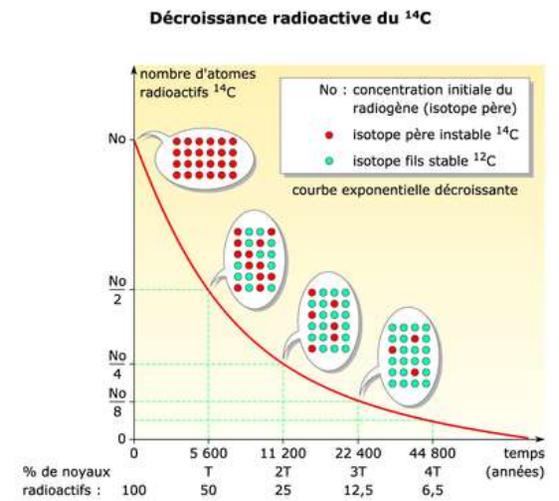
Ils ne sont pas des horloges mais mesurent une durée



Métronome



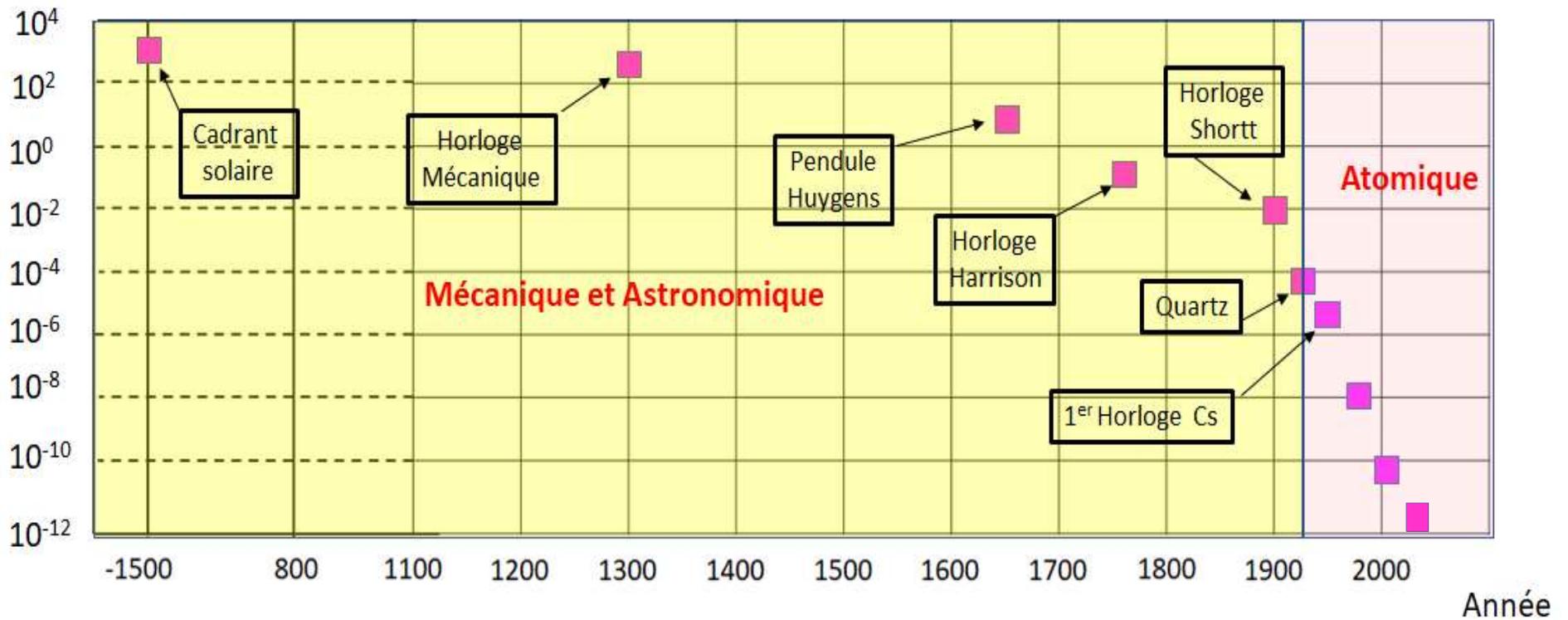
Sablier  
(minuteur)



Datation

## Evolution dans la mesure du temps

Ecart de marche par  
jour en secondes



## Evolution dans la mesure du temps

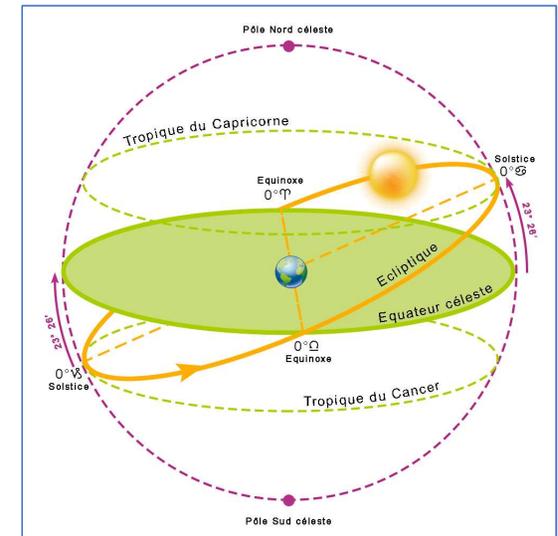
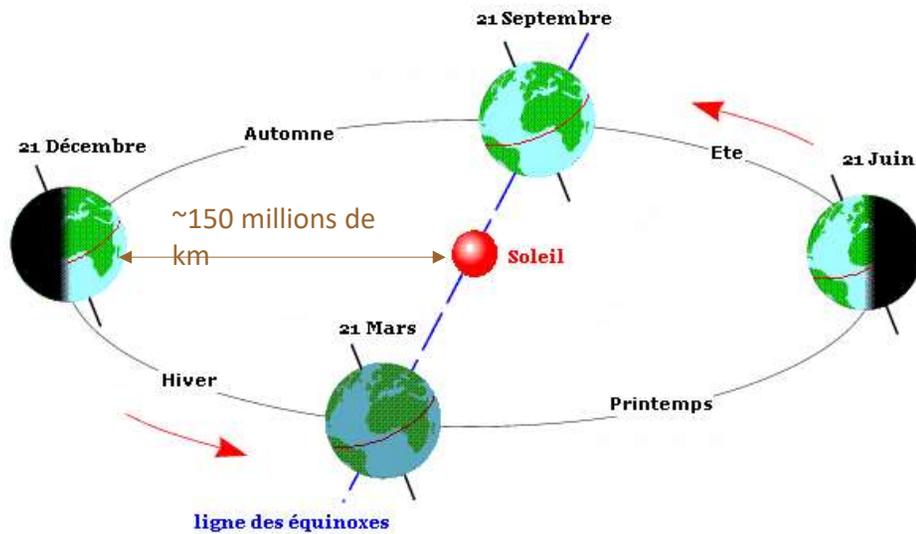
### Quelques remarques

- L'Homme est confronté à la mesure du temps depuis plus de 4000 ans
- Dans cette période la précision de la mesure des durées est passé de **1 h / j** à  **$10^{-12}$  s / j**
- La précision de tous les jours est souvent de quelques minutes ( réunions, transport, etc)
- En toile de fond la société moderne est synchronisée à  $10^{-6}$  s pour la bourse à  $10^{-9}$  s GPS, ...
- La mesure de la durée est la grandeur physique la plus précise. La plupart des autres grandeurs sont définies en référence au temps.

-- > *Des 7 unités fondamentales, 5 sont définies sur la base du temps*

# La mesure du temps long.

## ❖ Terre, Lune : Oscillateur astronomique



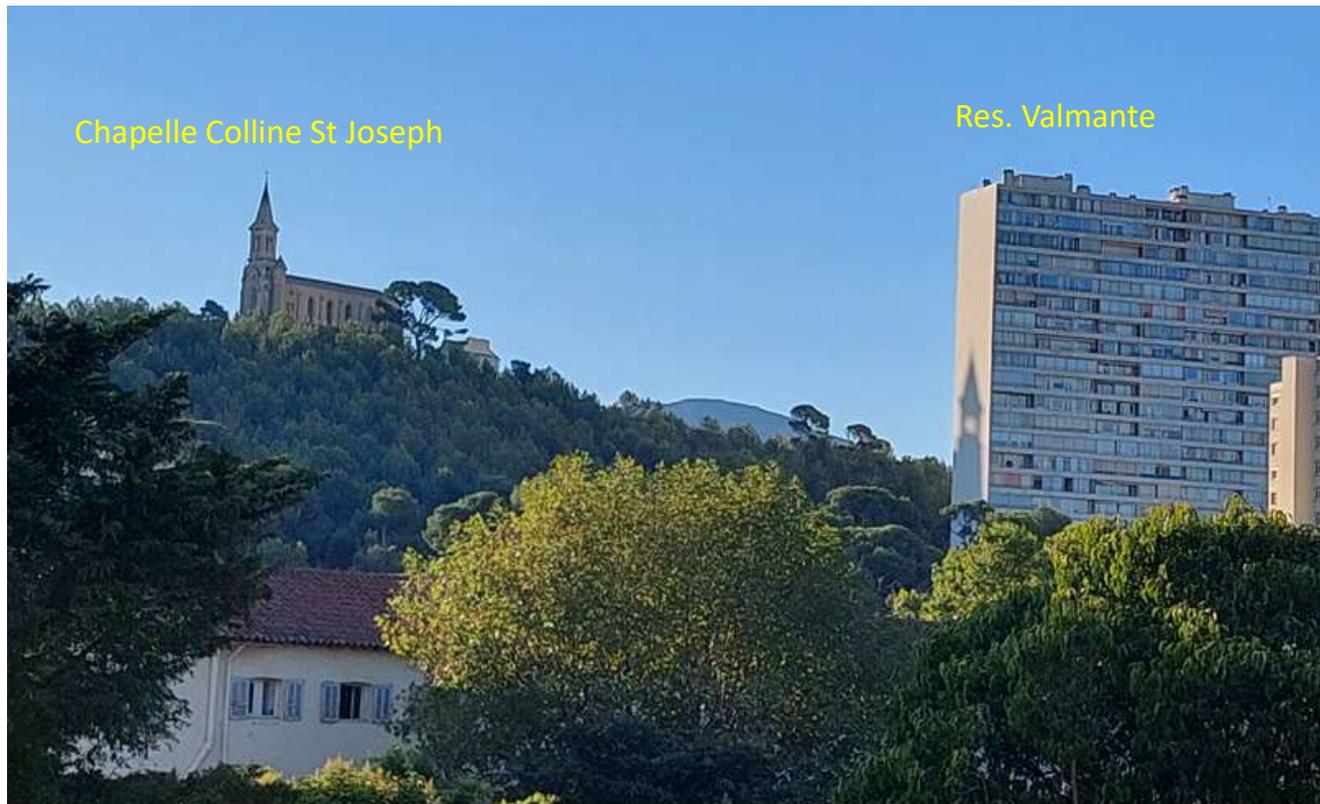
Alternance des saison → Année

Une révolution autour du Soleil en  $\sim 365$  j



Solstice d'été – Stonehenge (UK)

## Mon Stonehenge particulier



## La mesure du temps long.

❖ Terre, Lune : Oscillateur astronomique

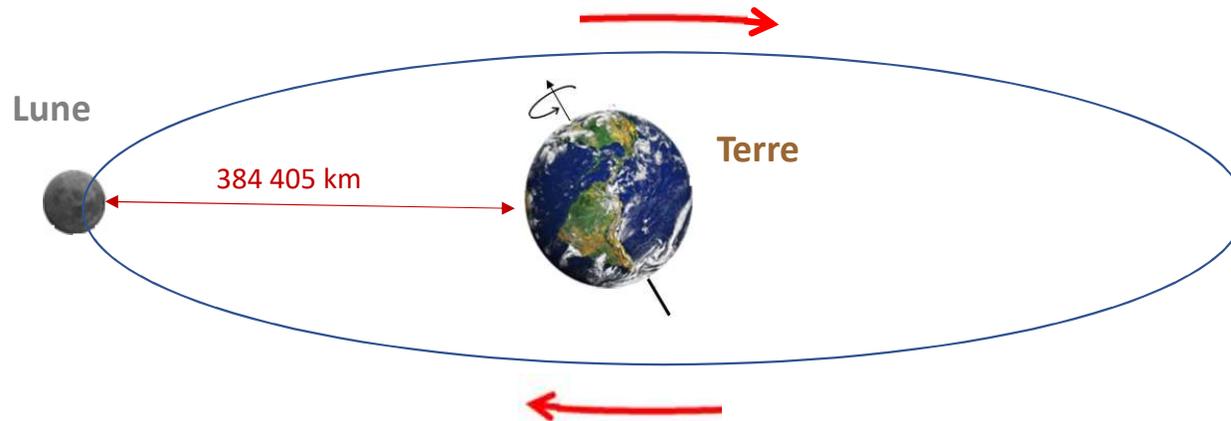
Alternance jour/nuit → Jour → Heure

Un tour sur elle-même en 1 j -> 24h



## La mesure du temps long.

### ❖ Terre, Lune : Oscillateur astronomique



Alternance lunaire → Mois

Un tour autour de la Terre en ~30 j

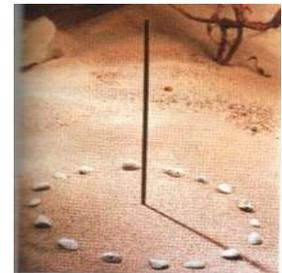
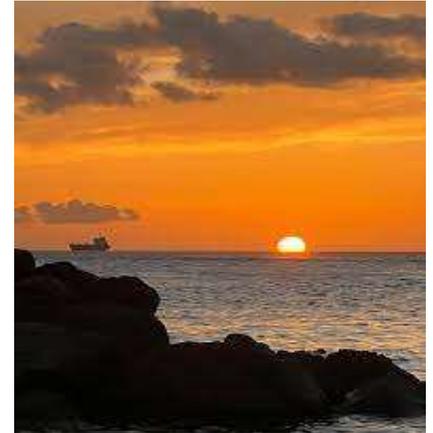
## Le temps des ombres.

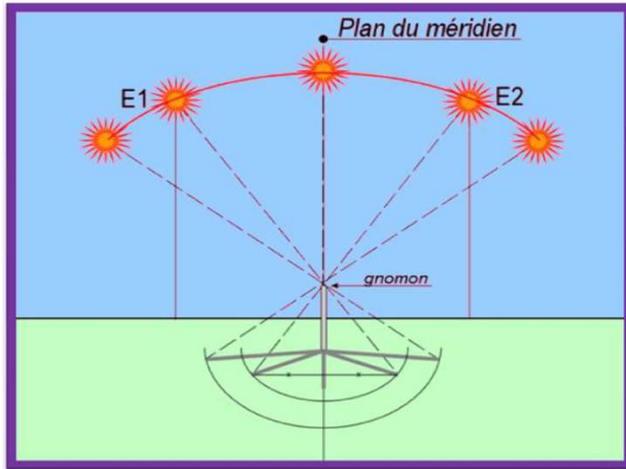
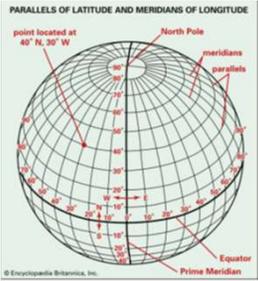
- ❑ L'observation du Soleil n'est pas toujours facile (c'est même dangereux), à part au lever et coucher



- ❑ Rapidement on se rend compte que l'ombre portée par un simple bâton planté dans le sol (gnomon) était plus sûre facile et efficace.

- ❑ La lecture de l'ombre sur un cercle de repères au sol transforme le simple gnomon en cadran solaire.

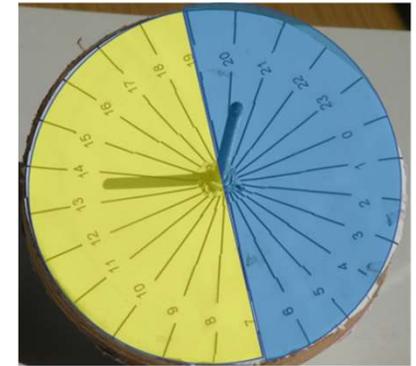




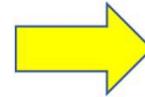
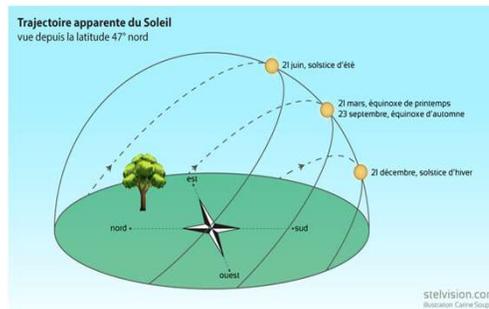
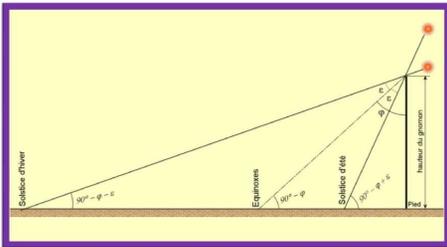
- Projection symétrique entre le lever et le coucher du Soleil par rapport au plan méridien du lieu.



Division du jour en 12 h de jour et 12h de nuit - Egyptiens



- Mais le gnomon n'est pas une bonne horloge : la longueur des ombres portées et la plage d'ensoleillement variable dans l'année.



Heures inégales ou temporaires

Parcours du Soleil dans le ciel suivant les saisons

- Hérodote (430 av. J – C) attribue l'invention de « l'horloge » solaire au Babyloniens vers 1500 av. J – C mais il est certainement plus ancien.

Gnomon → Obélisque



Obélisque de la Concorde



Obélisque Vatican



Aiguille de Cléopâtre, Londres



Obélisque Washington

Obélisques modernes



Obélisque de Mazargues

## Miniaturisation du gnomon

- ❑ Polos et Scaphé: Le style (le gnomon) est planté verticalement/horizontalement au centre. L'ombre se déplace à l'intérieur du bol dont la surface interne est divisée en 12 portions égales.



Polos moderne



Scaphé grec

- ❑ Au Moyen Age de cadran solaire sont affichés dans les églises et monastères souvent pour les heures de prière



*(Vepré, None, Sexte, Tierce, Prima)  
(Complices, Matines, Laudes)*

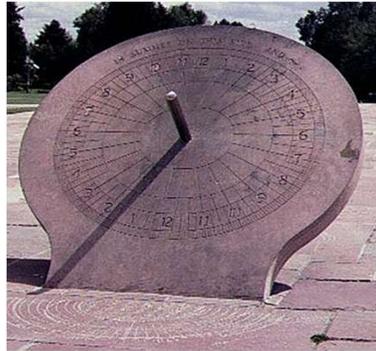
- ❑ Vers le XIV le stylet horizontal est remplacé par un stylet parallèle à l'axe de la Terre  
→ même emplacement des heures



□ La gnomonique va se poursuivre jusqu'aujourd'hui.



Cadran horizontal



Cadran équatorial

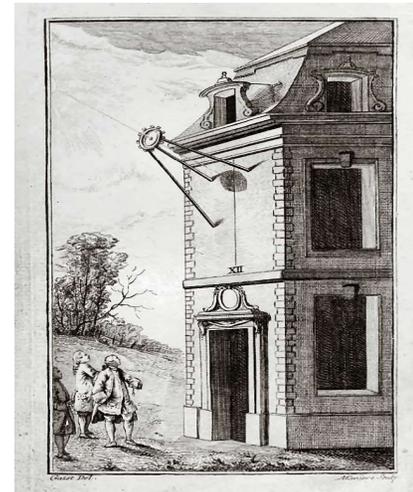


Cadran équatorial armillaire

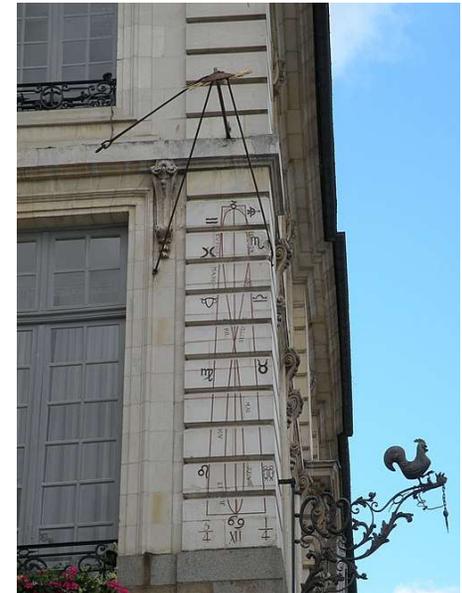


Cadran bague

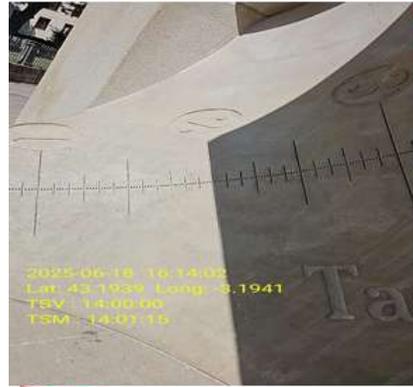
## Méridienne



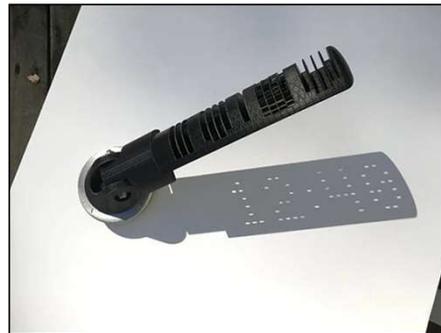
Réglage de l'heure sur la méridienne équipée d'un gnomon à œilleton.



Méridienne avec analemme pour correction, à midi, du temps moyen au temps solaire vrai



Cadran solaire de precision  
Balmaseda (Vizcaya)



Cadran solaire digital

Encore quelques « cadrans » solaires

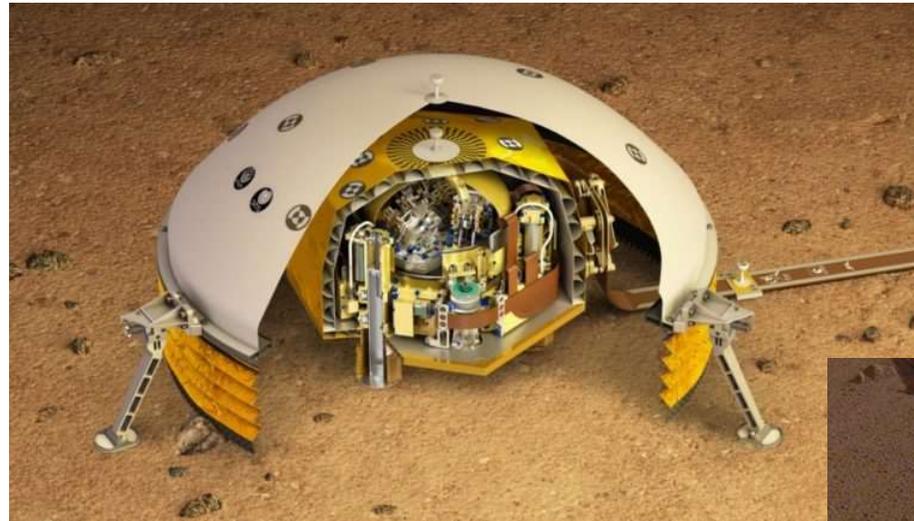


Observatoire de Jantar Mantar à Jaipur (1724)

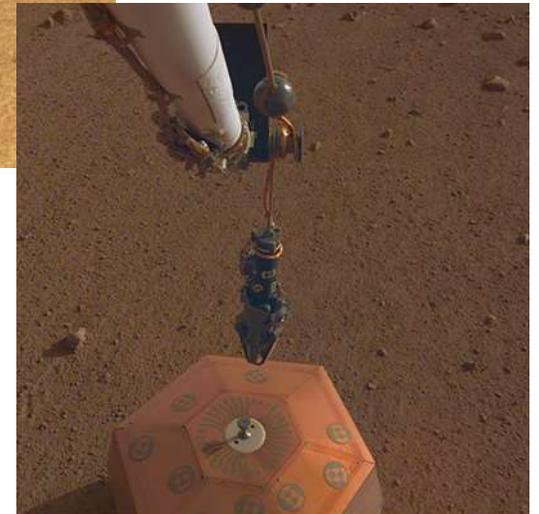
## Gnomons astronomiques



Gnomon Apollo 17



Le gnomon solaire de InSight à la conquête de la planète Mars (2018)



## La clepsydre

## Le temps fluide.

- La nuit ou par mauvais temps il est impossible de connaître l'heure avec un cadran solaire  
=> Il faut un « garde temps » indépendant de la lumière.

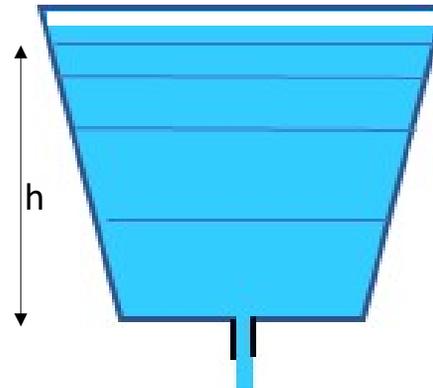
La clepsydre n'est pas une horloge mais plutôt un « minuteur »

→ *gestion des gardes, garant du temps de parole, cérémonies religieuses, ...*



Clepsydre égyptienne  
(Karnak -1415 -1308 av JC)

A l'intérieur 12 colonnes verticales graduées sont réparties sur la surface interne, chacune correspondant à un mois de l'année. Chaque colonne est graduée en 12 h égales.

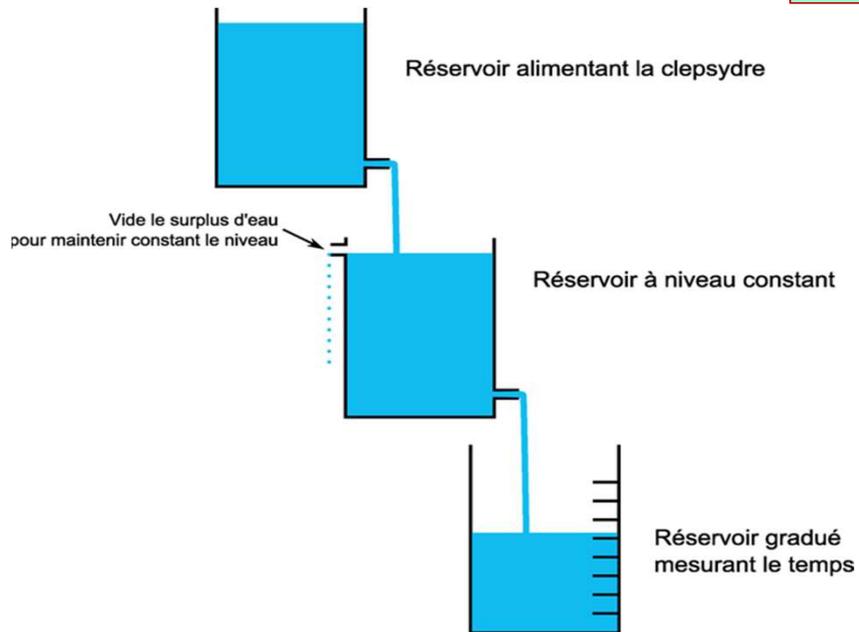


La vitesse d'écoulement dépend de la hauteur d'eau

Une forme conique tronquée assure un débit plus ou moins constant

→ **Clepsydre à remplissage unique**

## Le temps fluide.



L'addition d'un réservoir intermédiaire avec trop-plein garantie une hauteur constante et un écoulement constant.

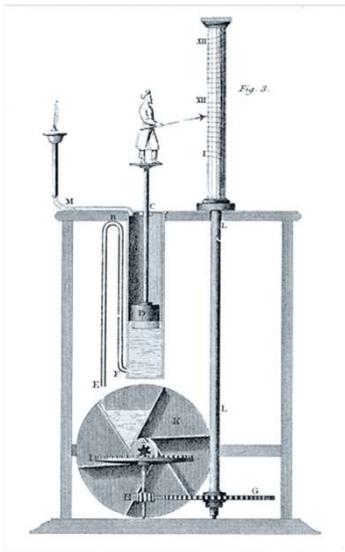
→ Clepsydre à débit constant

- Les clepsydres seront utilisées jusqu'au XVIIe siècle. -> Galilée

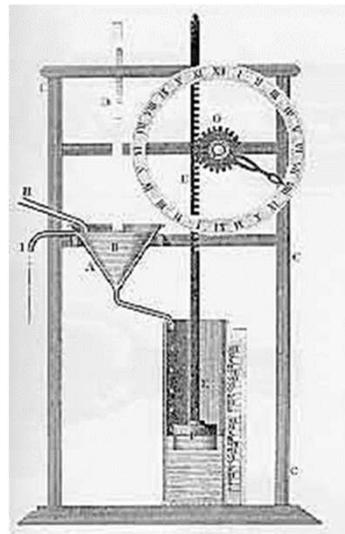
→ **Clepsydre à automate**

« Développées pas Ctésibius vers 270 av JC, vont être utilisées jusqu'au Moyen Age en Occident comme en Orient.

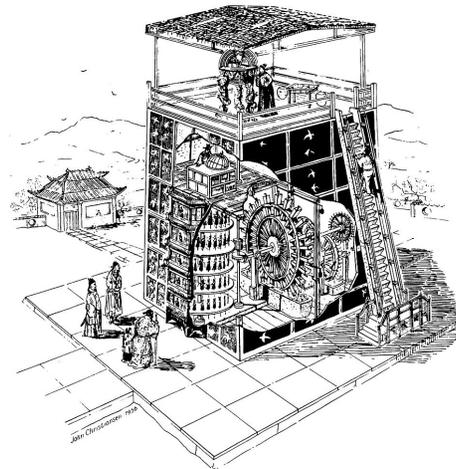
Très grande ingéniosité. Utilisation d'engrenages, rouages ou indicateurs horaires à aiguilles et autres pièces mécaniques.



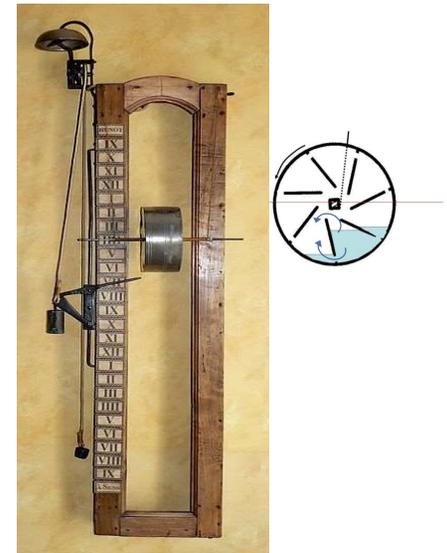
Clepsydre grecque - Ctésibius



Clepsydre romaine



Machine de Su Song (Chine ~ 1100)



Clepsydre à tambour  
(1270 – 1700)

## Le sablier

## Le temps fluide.

- Souvent utilisé comme icône universel du temps qui passe il apparait pour la première fois au VIII<sup>ème</sup> siècle.

-> difficulté technique liée au travail précis du verre (verre soufflé symétrique )



Sablier ancien : Deux ampoules en verre séparées par un disque percé et réunies par de la cire protégée par une ficelle



Sablier moderne



Allégorie du bon gouvernement (Palazzo Pubblico, Sienne ~1290)

*BERNOULLI, Daniel (1725). Calcule la forme ad hoc des ampoules de verre des sabliers.*

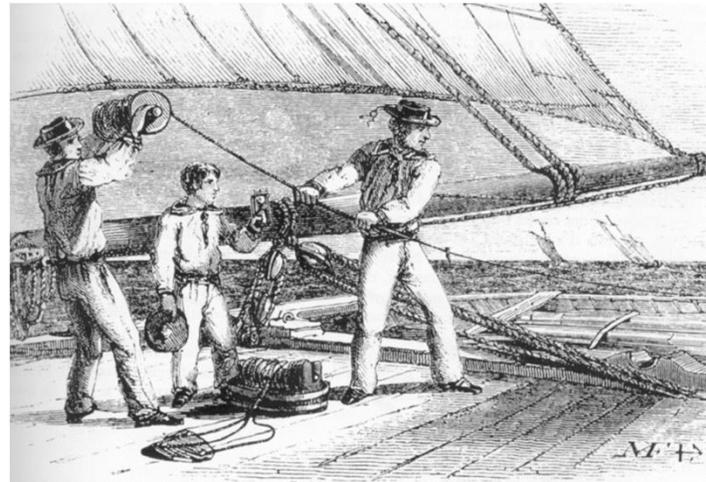
→ *Prix de l'Académie Royale des Sciences de Paris*

- ❑ Dès le **14<sup>ème</sup>** siècle, les sabliers sont utilisés principalement pour garder l'heure à bord des bateaux.

Plusieurs usages : 30 secondes permettait de calculer la vitesse du navire à l'aide du loch.

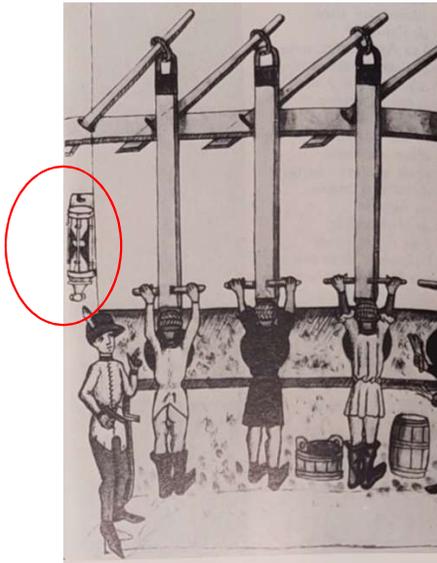
: 30 minutes rythmait la vie à bord (dictait les quarts de veille aussi bien que l'heure des repas).

: 4 heures estimait la durée des combats,



Utilisation du loch pour évaluer à l'aide d'un sablier la vitesse d'un navire

- ❑ Les sabliers étaient aussi couramment utilisés dans les amphithéâtres de l'université, dans les ateliers d'artisans pour régler les heures de travail, pour les prêches, etc .
- ❑ Les médecins, apothicaires et autres praticiens transportaient des sabliers miniatures ou de poche d'une durée d'une demi-minute pour chronométrer les impulsions ; cette pratique s'est poursuivie jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle.



Fabrication feux artificie



Durée des prêches



Prise du pouls

## Sablier 1000 ans à poix de l'Élysée



## Les horloges de feu

□ La combustion d'une bougie dans un lieu fermé permet de déterminer, assez précisément, un intervalle de temps.

□ De bougies graduées seront utilisées en Europe à partir du VIII<sup>ème</sup> siècle

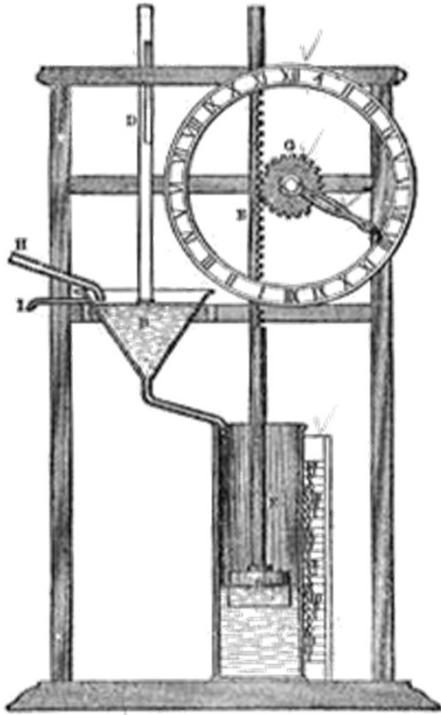


□ De dispositifs plus élaborés incluant de billes attachés à la bougie seront utilisés pour sonner certaines heures.



□ Au XV<sup>ème</sup> siècle apparaissent, des lampes à huile avec réservoir gradué. Ce type d'horloge va se maintenir jusqu'au XIX<sup>ème</sup> parfois incluant de cadrans.





## Le temps mécanique.

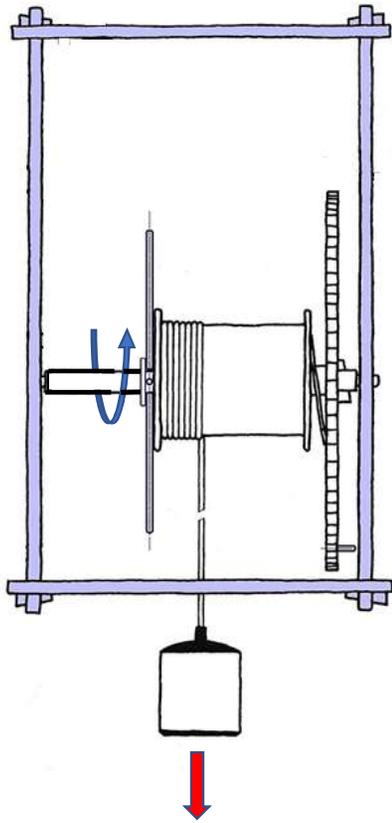
- Au XIII<sup>ème</sup> siècle, des roues dentées crémaillères et autres engrenages sont déjà disponibles depuis long temps et utilisés dans les horloges à eau.

Tant qu'il y a de l'eau ça fonctionne

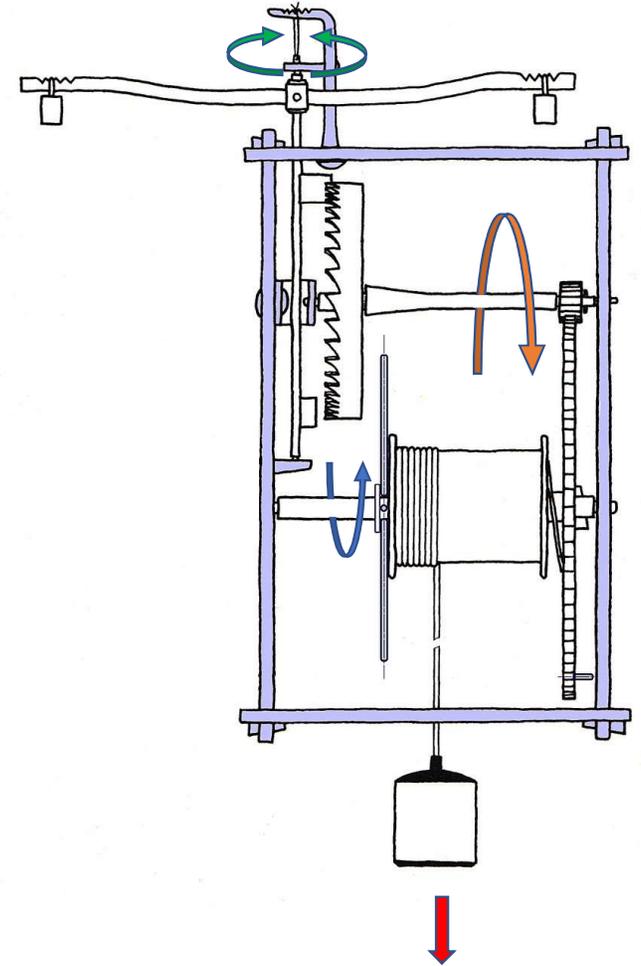
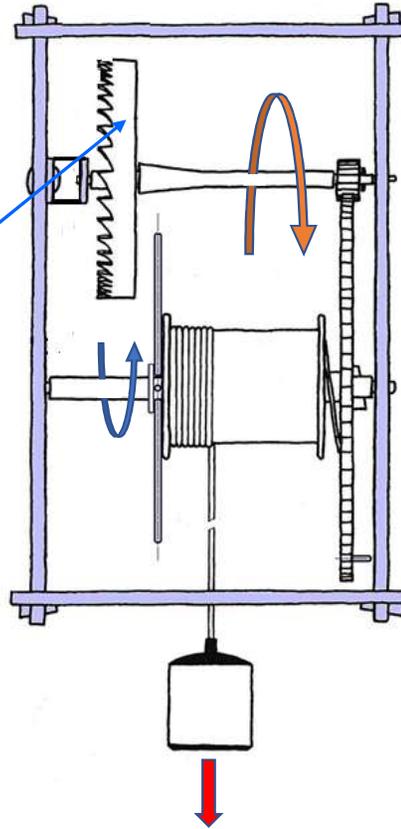
L'eau comme moteur

- Au XIV<sup>ème</sup> siècle, en Europe on va remplacer l'eau par la force d'un poids enroulé sur un cylindre.  
-> moins encombrant, ne gèle pas en hiver.

## La gravitation comme moteur

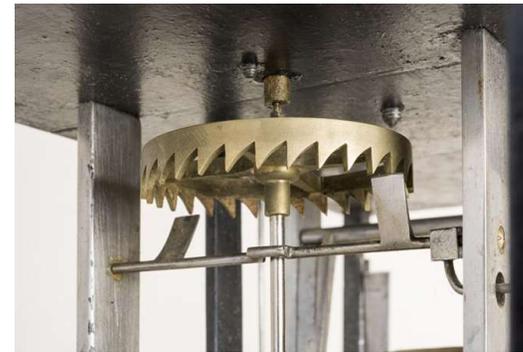
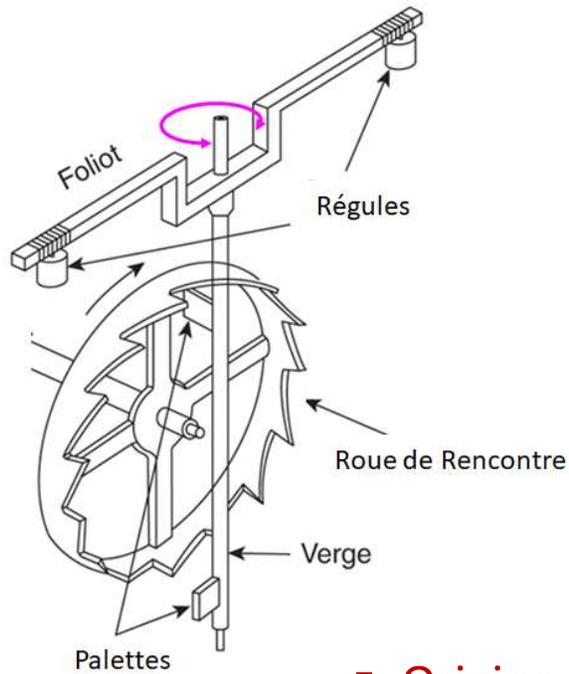


Roue de rencontre



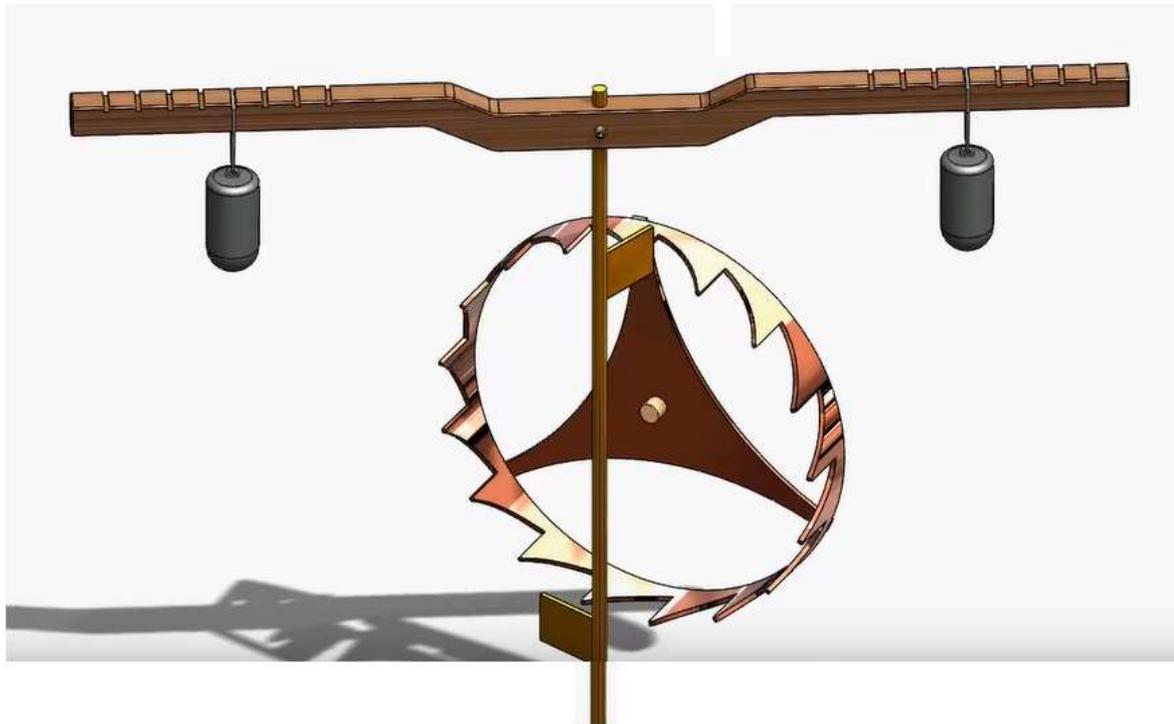
## Echappement à Roue de Rencontre, Verge, Foliot

*Au cœur du garde temps*



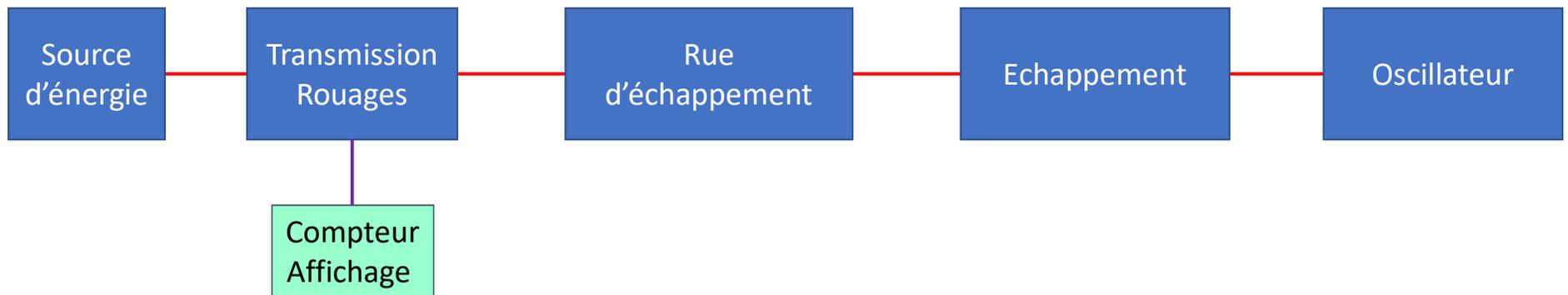
- Origine n'est pas connu (vers 1350).
- Le foliot présente un inconvenient majeur : pas de fréquence propre  
-> Le retard est d'environ 1 heure par jour.
- Malgré cela il va subsister jusqu'à 1656.

<https://www.youtube.com/watch?v=UhFPb-ZZTyI>



# Echappement

- L'échappement est le cœur de l'horloge mécanique
- C'est lui qui a le plus fait l'objet de modifications et inventions
- Chaque grand horloger a son échappement
- Plus de 2500 différents types d'échappement



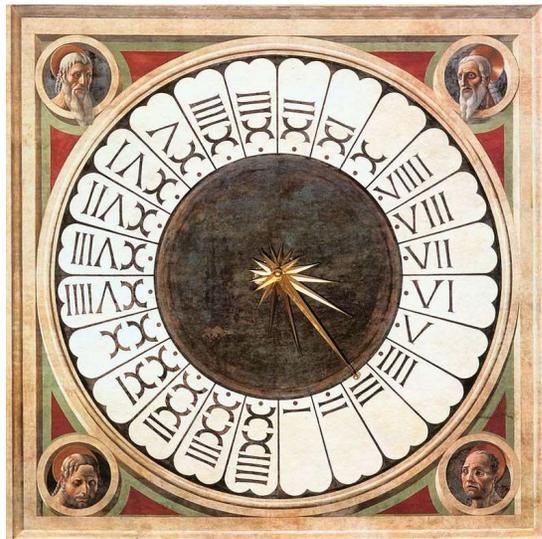
## Horloges de tour

- Cathédrales et Beffrois -

- La foi à heure fixe
- Prestige et pouvoir



Gros horloge Rouen 1389



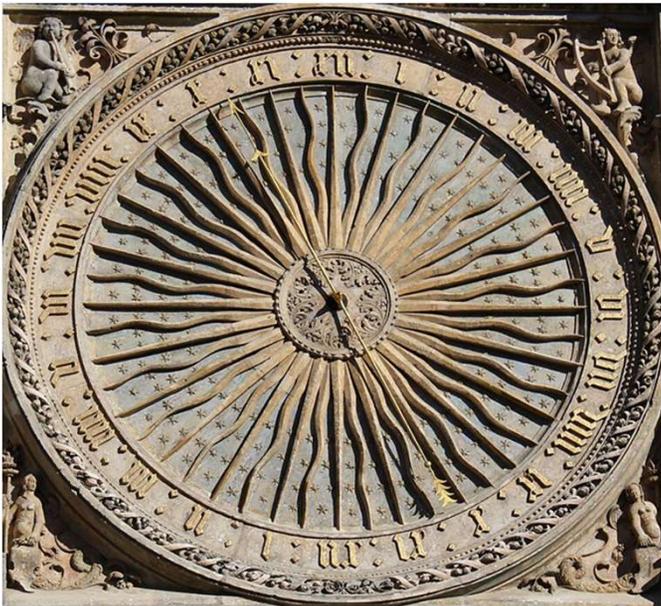
Cathédrale Florence 1443



Tour de l'Horloge du palais de la Cité, Paris 1370

## Horloges de tour

- Cathédrales et Beffrois -



Cathédrale de Chartres 1520

Les premières horloges mécaniques sont purement acoustiques  
Plus tard apparaît un cadran tournant avec une aiguille fixe .

Pendant long temps les cadrans n'ont qu'une aiguille des heures.  
Ce n'est qu'au XVII<sup>ème</sup> siècle qu'on ajoute l'aiguilles des minutes.

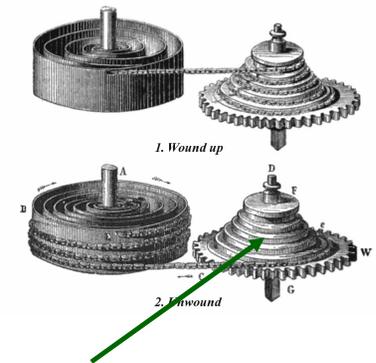
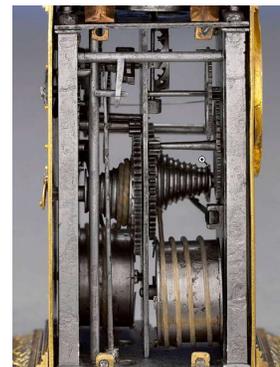
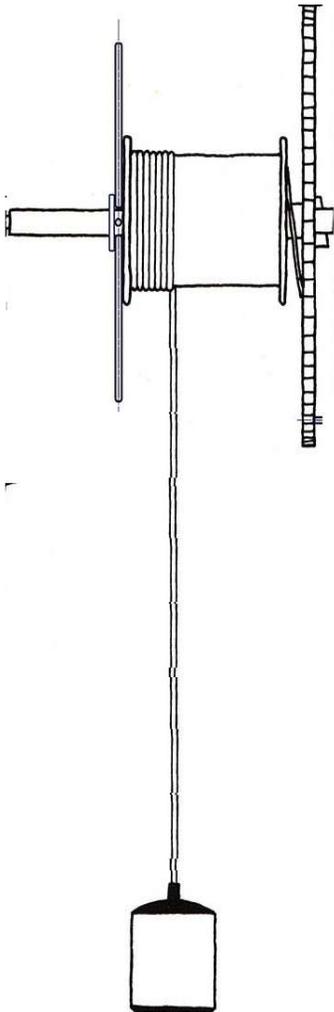
En 1730 on introduit l'aiguille des secondes.

## Horloges de table

### L'élasticité comme moteur

On remplace l'encombrement du poids moteur par la compacité du ressort

- Les premières horloges transportables, mues par un ressort apparaissent vers 1410.



La **fusée** pour homogénéiser la force du ressort



## La montre

*La puissance Ça se montre*

*La miniaturisation des horloges*

- Début du XVI<sup>ème</sup> à Nuremberg (Peter Henlein) crée le premier garde temps portable
- La corporation des horlogers est créée et la précision des horloges augmente (plusieurs minutes / jour fin XVI<sup>ème</sup>)

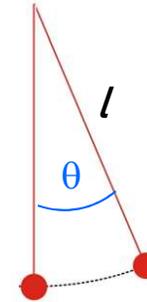


Œuf de Nuremberg

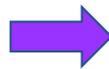


## Le pendule.

- Galilée 1583 : Isochronisme du pendule  
*(faux mais une bonne approximation)*



$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$



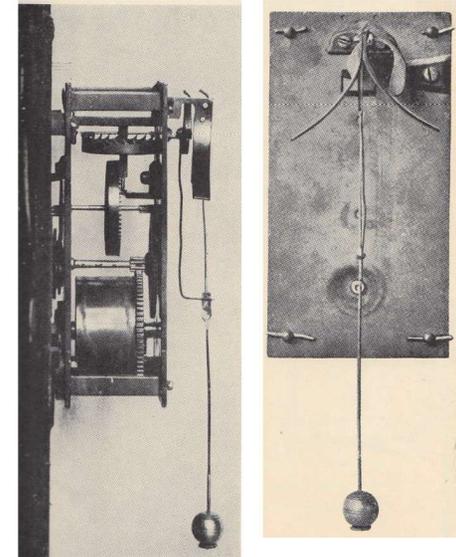
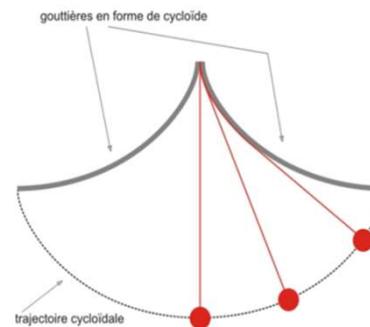
Période d'oscillation propre, indépendant de la masse

(→ un pendule de 1 m bat la seconde )



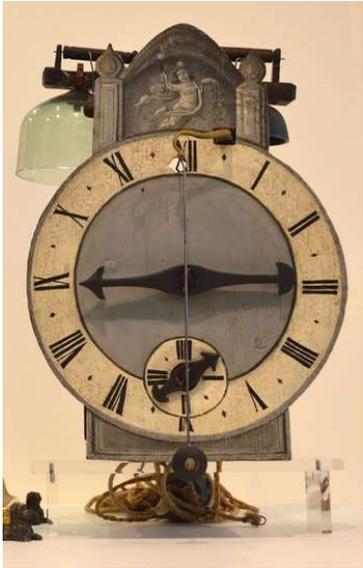
- Huygens 1657 : Le pendule est isochrone s'il a une petite amplitude

On oblige le pendule à suivre une trajectoire cycloïdale



## Horloges queue de vache

Dans certains cas on modifie les horloges existantes pour installer un pendule relié à l'échappement à verge



## Le pendule de torsion .



- En 1675 il invente un ressort spiral plat qui, associé à un anneau (volant), devient un pendule de torsion.

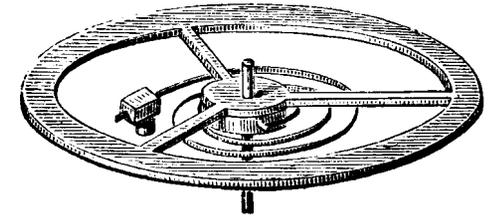
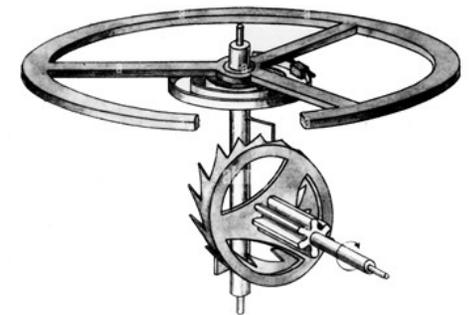


Fig. 820. — Ressort spiral.

→ Insensible à la position de l'horloge, compact, la montre peut prendre son envol

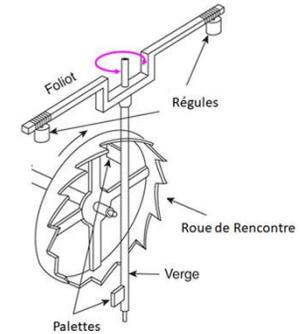


- Avec un pendule la précision des horloges passe a moins de 1 min/jour



## Echappement à ancre

- ❑ L'échappement à verge présente plusieurs inconvénients :
  - en général amplitude d'oscillation importante
  - recul lors de contact → perte d'énergie



=> Plus de 350 ans après son invention, l'échappement à verge est remplacé par échappement à l'ancre

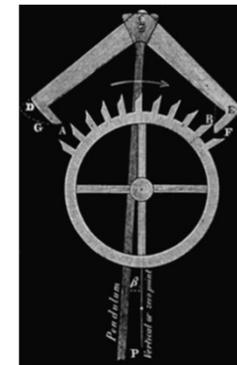
- ❑ En 1671 à Londres, William Clement (R. Hooke) invente l'échappement à ancre de recul.

### Avantages :

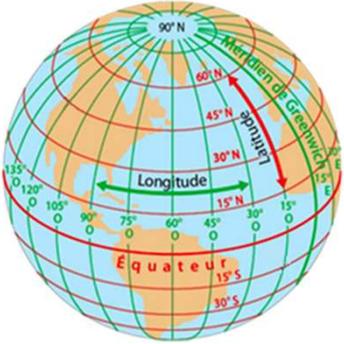
- L'échappement et le roue d'échappement sont dans le même plan
- L'angle d'oscillation est de quelques degrés => isochronisme



- ❑ En 1715 Georges Graham perfectionne l'échappement de Clement.  
→ Echappement a repos.



## Vers la grande précision - La Longitude -



- Deux coordonnées pour se repérer en mer : Latitude et Longitude

Latitude : facile -> hauteur Soleil / étoile polaire

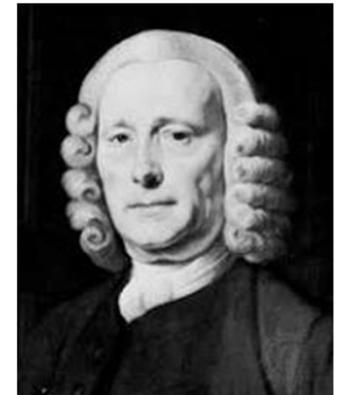
Longitude : beaucoup plus difficile -> observation astronomique (Jupiter, Lune) ou horloge



« The Scilly naval disaster of 1707 »

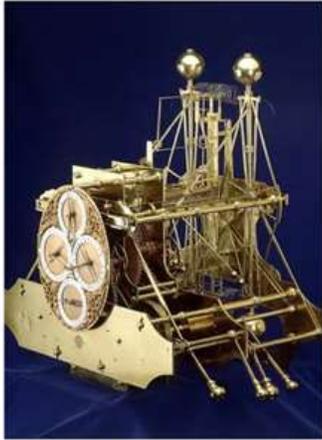
- Erreur dans le positionnement => catastrophe
- Le « Longitude Act » parlement britannique, 1714 : 20 000 livres pour qui déterminera la longitude à mieux que  $0.5^\circ$

- John Harrison, ébéniste et horloger génial. Il construit entre 1730 et 1760 quatre horloges (H1, H2, H3, H4) le H4 présente un décalage de 5 secondes entre Portsmouth et la Jamaïque soit  $1/50^\circ$  de degré.

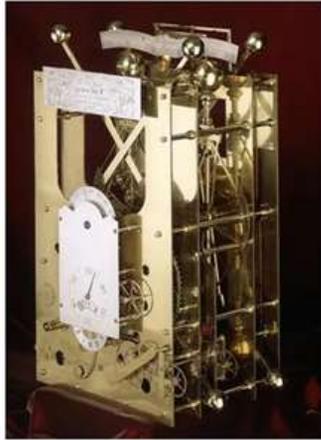


*Dava Sobel : Longitude : l'histoire vraie du génie solitaire qui résolut le plus grand problème scientifique de son temps*

## Les Chronomètres de Harrison et ses « successeurs »



H1



H2



*Thomas Mudge*



*Thomas Earnshaw*



H3



H4



*Abraham Luis Breguet*



*John Arnold*



Julien Le Roy

Quelques uns de plus grands  
horlogers français du XVII<sup>eme</sup> et  
XVIII<sup>eme</sup> siècle



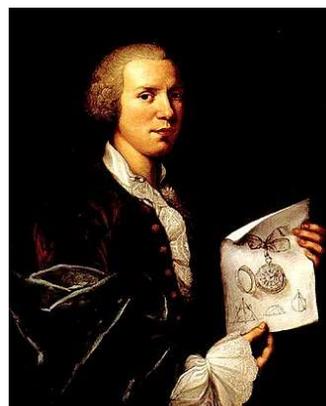
Pierre Le Roy



Abraham-Louis Breguet



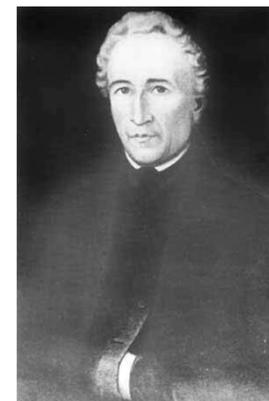
Antide Janvier



Ferdinand Berthoud



Jean-André Le Paute



Jean-Antoine Lepine



Horloge Astronomique  
Antide Janvier



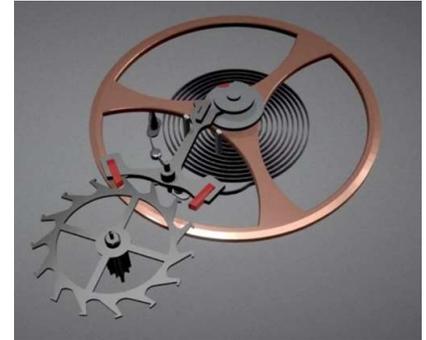
Horloge à équation  
Ferdinand Berthoud



Horloge sympathique  
Abraham – Louis Breguet

## Du gousset au poigné

- L'invention de l'échappement libre, le système anti-choc, le remontage automatique, le coussinet à rubis, etc, vont permettre la miniaturisation des mouvements et le développement de la montre moderne



### ▪ Montre à gousset



### ▪ Montre bracelet (début XX<sup>ème</sup>)



Santos Cartier



Mouvement automatique



### Montres à complication

Chronographe

Jour, mois, année bissextile Indication jour/nuit

Phases de lune

Petite seconde

*Les savoir-faire en mécanique horlogère et mécanique d'art sont inscrits sur la liste représentative du patrimoine culturel immatériel de l'humanité en décembre 2020 par l'UNESCO*



## Quelle heure est-il ?

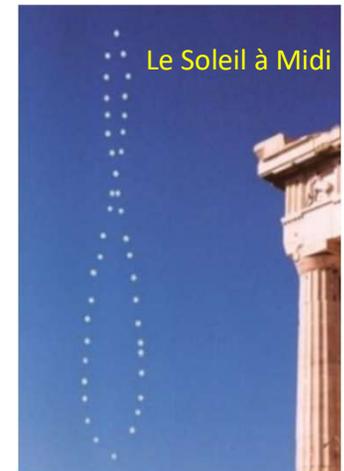
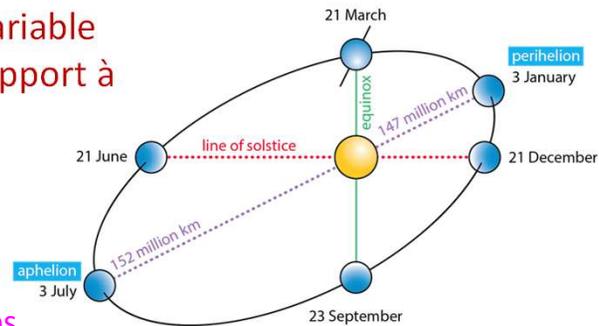
### ■ Analemme : position du Soleil à une heure fixe au cours d'une année

- Orbite elliptique de la Terre au tour du Soleil : vitesse variable
- Inclinaison de l'orbite de la Terre autour du Soleil par rapport à l'équateur terrestre

### ■ Heure vrai ou moyenne ?

- Temps solaire vrai : cadran solaire
- Temps solaire moyen : horloge

→ Equation du Temps



**En 1816 on décide que le temps public à Paris est le temps moyen et non plus le temps des cadrans solaires.**

Mais l'heure dépend du méridien : Brest 4° 29' ouest, Strasbourg : 7° 45' est => ~ 50 minutes de décalage

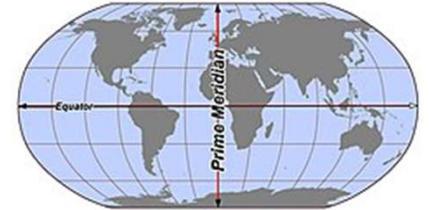
Avec l'arrivée du chemin de fer on décide que l'heure d'une ville est l'heure solaire moyenne mais l'heure de la gare est l'heure de Paris.



**Le 14 mars 1891 on décrète que l'heure légale en France serait l'heure de Paris (Observatoire de Paris )**

## A chacun son heure

En 1860 la Suisse choisit comme heure officielle celle de Berne  
En 1880 l'Angleterre choisit l'heure de l'observatoire de Greenwich  
En 1893 l'Allemagne choisit l'heure de Berlin  
etc ...



L'internationalisation du commerce pousse en 1884 à la conférence de Washington à définir un méridien original et une heure de référence universelle :

**=> ca sera le méridien de Greenwich pour tous**

Sauf pour les irréductibles gaulois qui préfèrent l'heure de Paris.

→ **Le 9 mars 1911 la France adopte comme heure légale l'heure moyenne de Paris retardée de 9 minutes et 21 seconde (!)**

( Pile la différence entre  
Paris et Londres



→ **La loi de 1911 est abrogée par le décret du 9 août 1978 qui fait du temps universel coordonné (UTC mis en place en 1972) la base du temps légal en France, abandonnant définitivement la référence à l'heure de Paris**

## Les fuseaux horaires

- Proposé par Giuseppe Barilli en 1858 et re-introduit en 1876 par Sandford Fleming.

Théorie : on découpe le globe terrestre en 24 zones de 15°. Chaque zone ou fuseau possède une heure déterminée avec comme origine le fuseau autour du méridien de Greenwich

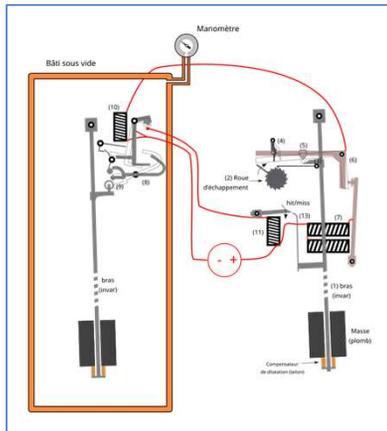
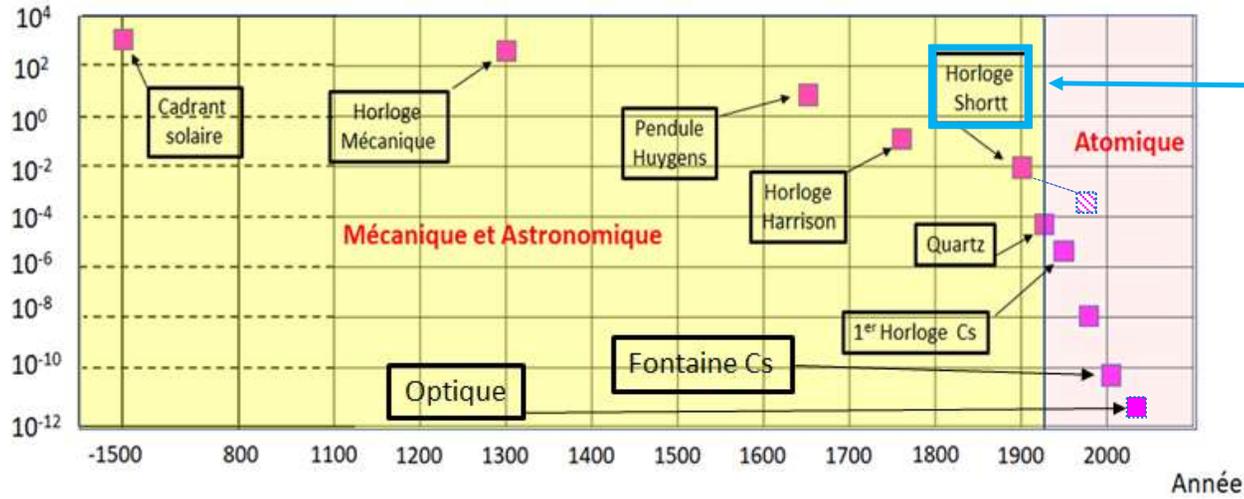
Réalité : beaucoup plus compliquée.



Ligne de  
changement de  
date

# Vers la très grande précision

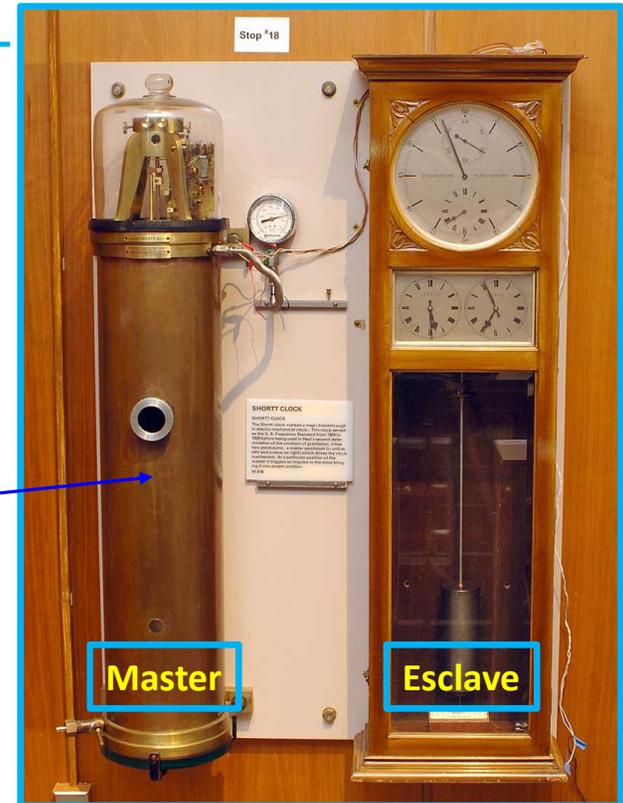
Ecart de marche par jour en secondes



Pendule dans le vide sans lien mécanique

Boucle de rétroaction entre le Maître et l'Esclave  
Synchronisation Master et Esclave

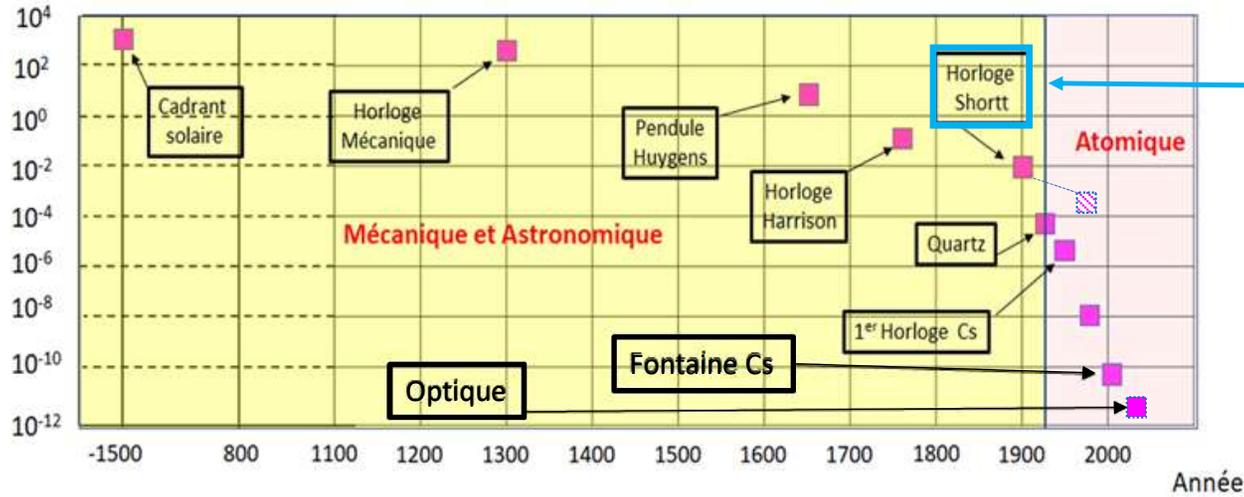
Pendule de Shortt - 1921  
Mécanique assistée  
(observatoire astronomique)



0.1 s / an

# Vers la très grande précision

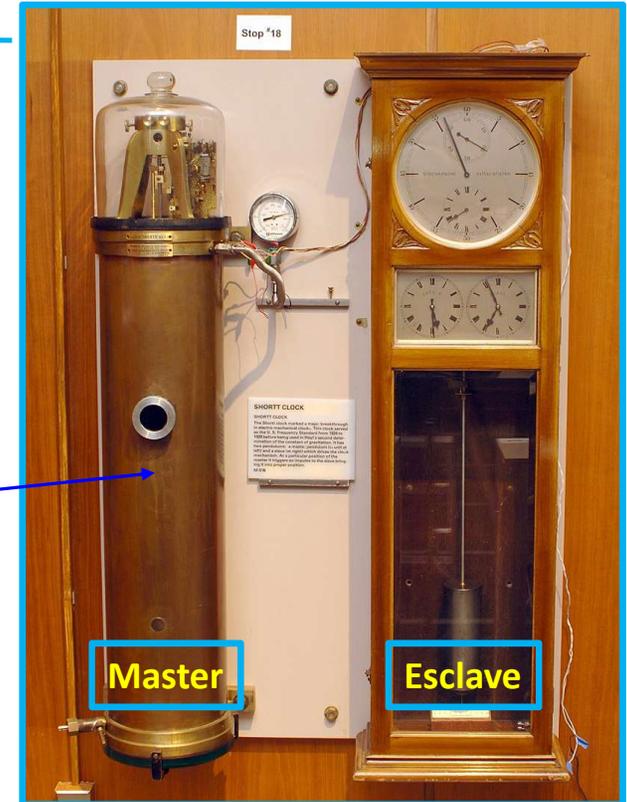
Ecart de marche par jour en secondes



Pendule dans le vide sans lien mécanique

Boucle de rétroaction entre le Maître et l'Esclave  
Synchronisation Master et Esclave

Pendule de Shortt - 1921  
Mécanique assistée  
(observatoire astronomique)

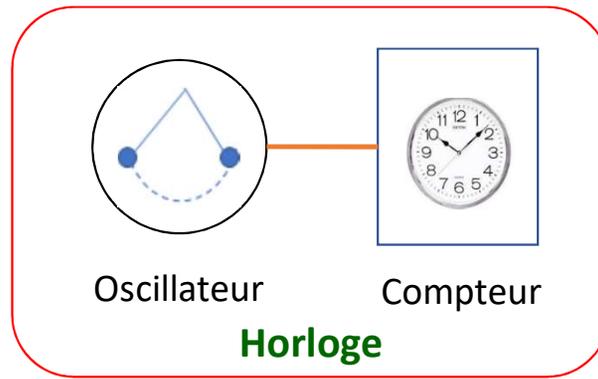
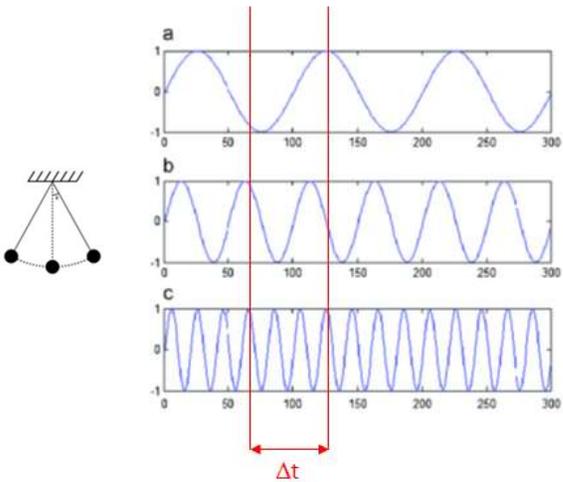


0.1 s / an

# Précision de la mesure

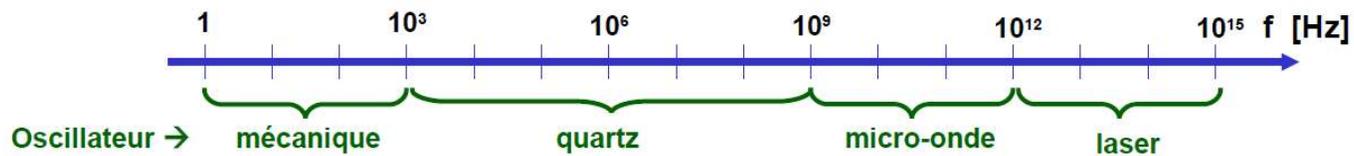
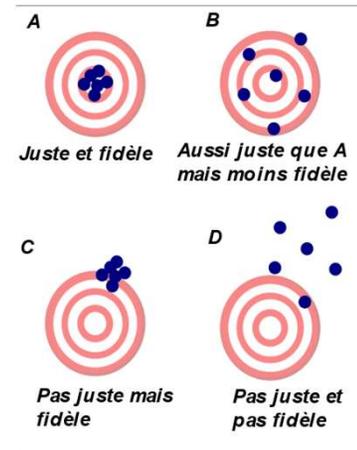
## Fréquence de l'oscillateur.

Plus la fréquence est grande et mieux  $\Delta t$  est estimé.



## Justesse et fidélité

La fidélité est le paramètre primordial

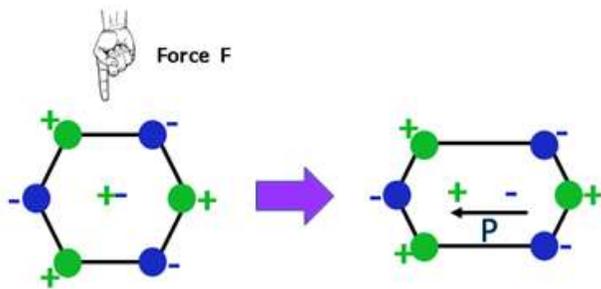


# L'horloge à quartz

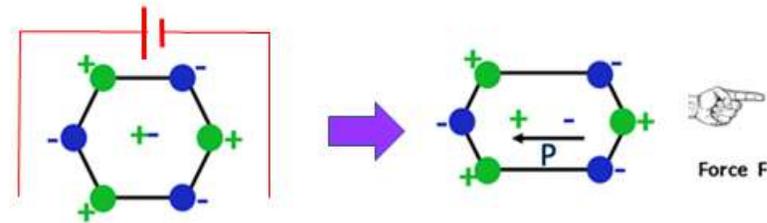


- Cristal d'oxyde de silicium  $\text{SiO}_2$
- En 1880 Pierre et Jacques Curie découvrent la piézoélectricité

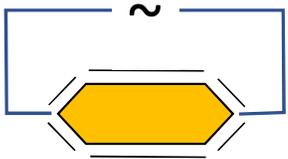
Jacques et Pierre



- Déformation => Charge.



- Charge => Déformation (Lippmann 1881)



- Boucle de rétroaction  
→ Oscillation résonante

Quartz : fréquence propre ~ kHz au ~ MHz



Diapason

## L'horloge à quartz



- Première horloge à quartz en 1927, Warren Marrison
- Première montre à quartz en 1967  
Calibre beta 21 du Centre Electronique Horloger  
Neuchâtel (CH)

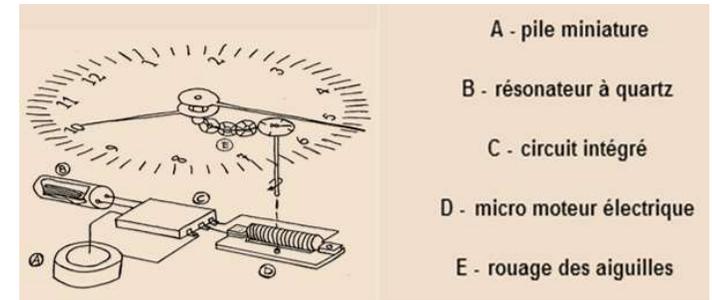


Omega constellation (Beta 21)



- Première montre commerciale 1969,  
Seiko Astron 35SQ
- Comment ça marche tout ça ?

- Le Cristal oscille à 32768 Hz
- Il est asservi par un CI dans lequel on peut mesurer la fréquence ( $2^{15} = 32768$ ) => 1 Hz
- On envoie un signal à un moteur pas à pas.



Chronomètre COSC 0.07 s/j

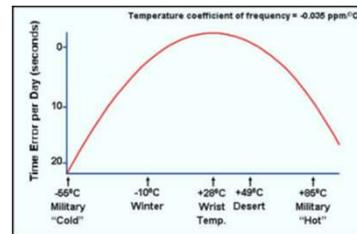
0.03 s /an

Boucle de rétroaction  
Quartz et CI

# L'horloge à quartz

## ❑ Point faible : température

- Montres à compensation thermique



Seiko Twin Quartz

## ❑ Point faible : autonomie

- Batterie lithium et mode « économie d'énergie » -> 10 ans

- Les hybrides : Autoquartz



Seiko Kinetic

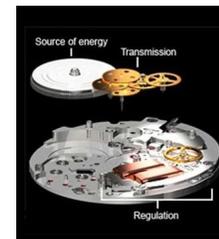
- Montres à énergie thermique

- Montres tri-synchro

- Montres solaires



Citizen Eco drive

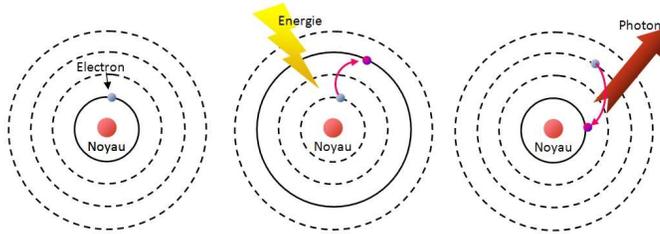


Grand Seiko

# Le temps atomique



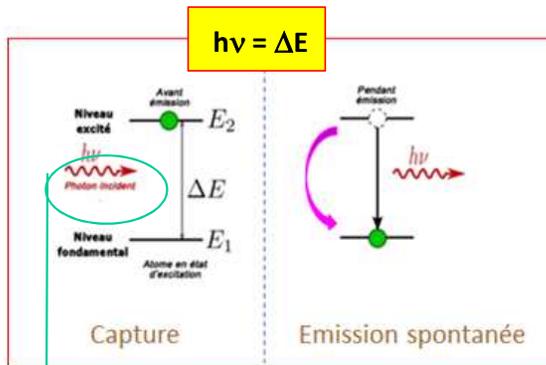
- Atome de Bohr 1913



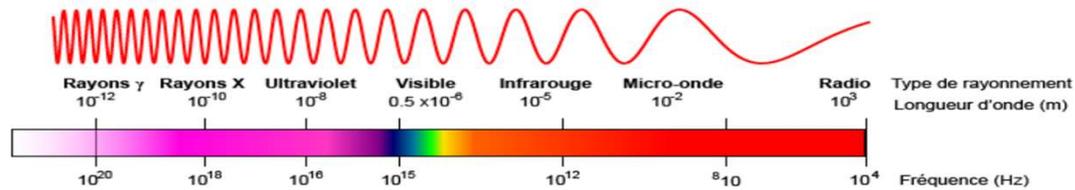
Atome d'hydrogène

Structure atomique quantifiée

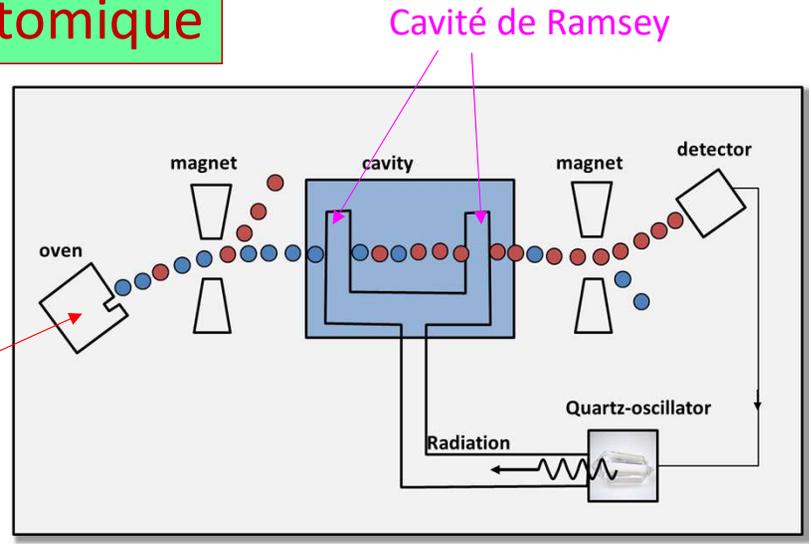
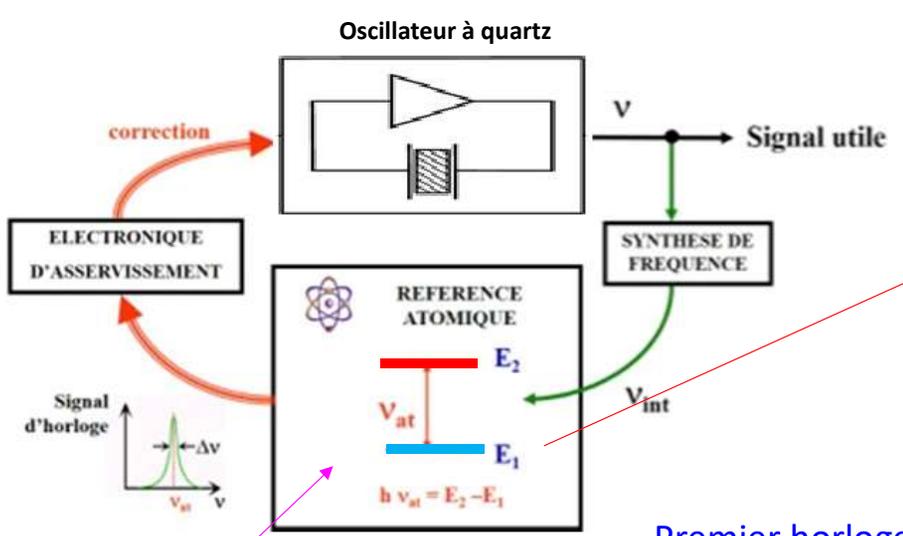
**Structure atomique est parfaitement bien définie et totalement stable**



On va utiliser l'atome comme Maitre dans une boucle de rétroaction



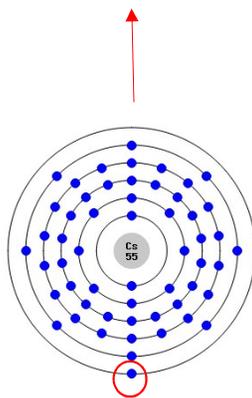
# Le temps atomique



Premier horloge au Cs : 1955 L. Essen et J. Parry

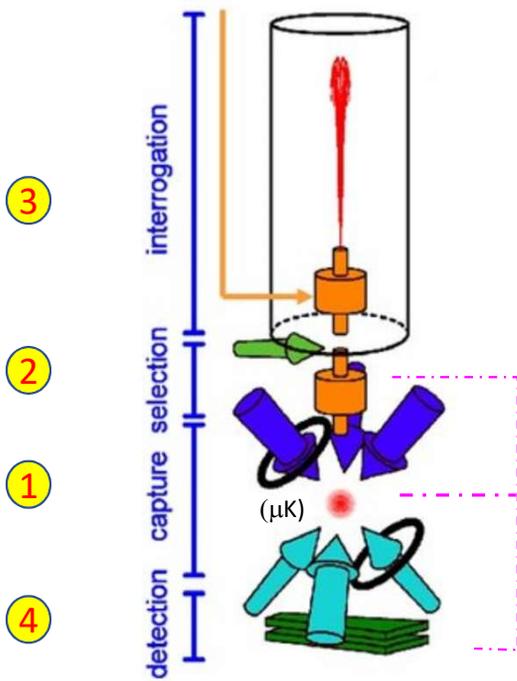
**3 μs / an**

$\nu = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$



Plus de temps les atomes restent dans la cavité meilleure est la résolution





3

2

1

4

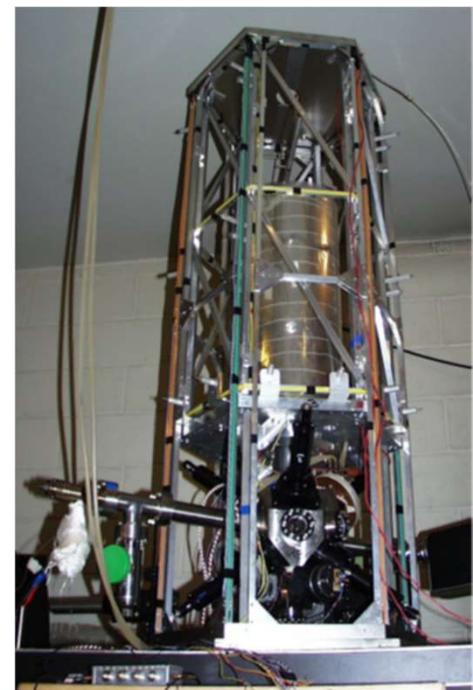
## Le temps atomique

### Fontaine atomique

▪ L'atome est ralenti (refroidi) et interrogé pendant la montée et la descente dans le champ gravitationnel.

=> Temps d'interrogation 100 fois supérieur.

6 ns/an



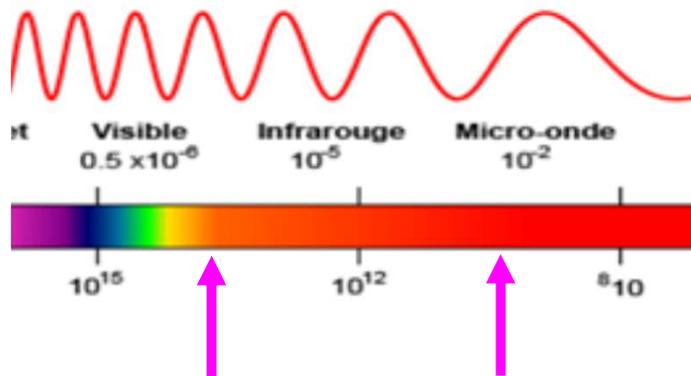
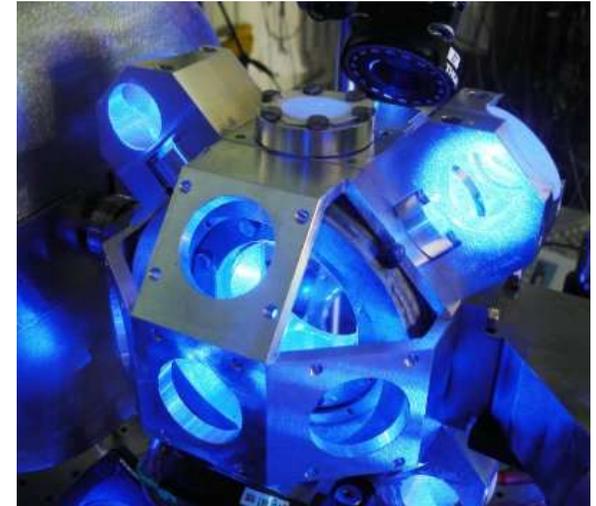
- 1) Capture, refroidissement des atomes
- 2) Sélection de l'état des atomes
- 3) Interrogation de Ramsey
- 4) Détection de l'état des atomes

En 1967, la 13<sup>eme</sup> Conférence générale des poids et mesures adoptait comme définition de la seconde, : « la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133. »

## Le temps atomique

### Horloges optiques

- Nouvelle génération d'horloges atomiques (~ 1990)
- Atome  $^{87}\text{Sr}$  avec transition dans le visible  
→ 429 228 004 229 879 Hz
- Source Laser ultrastable

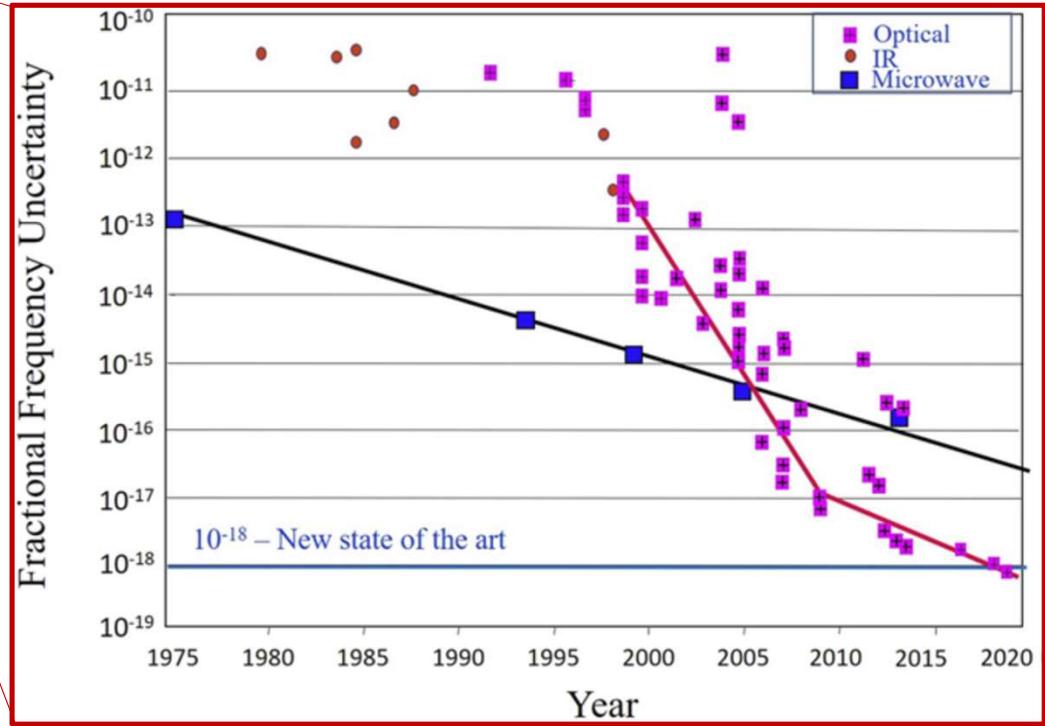
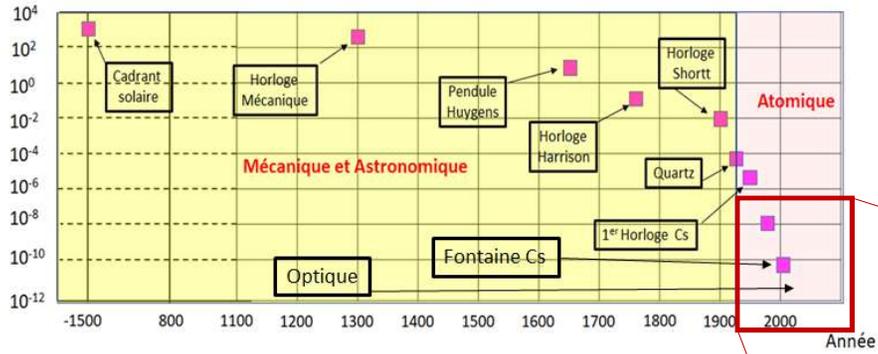


- En 2018, le JILA a construit des horloges manipulant les atomes de Sr avec une précision très supérieure à celle des horloges au Cs

7 ps / an

# Le temps atomique

Ecart de marche par jour en secondes



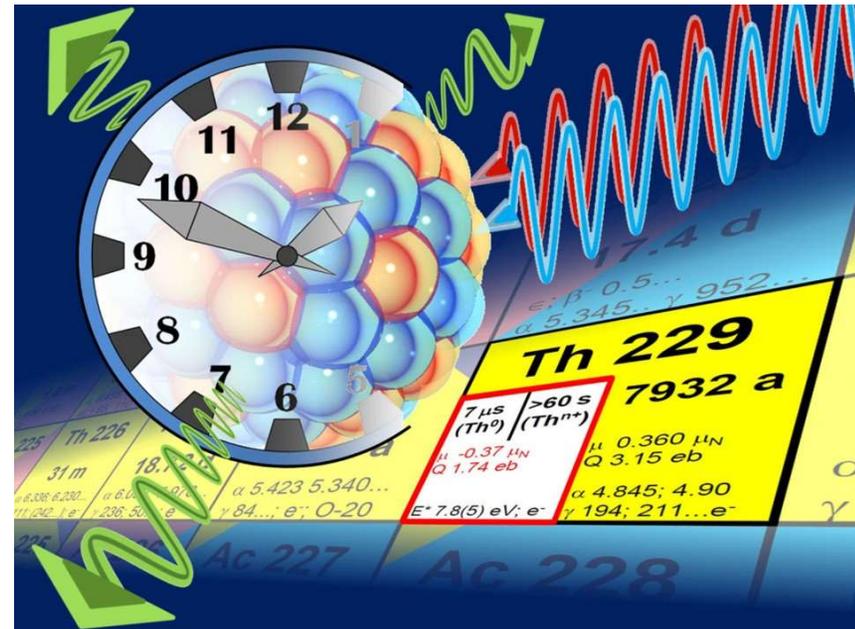
## Le temps atomique

Et ce n'est pas tout

Bientôt horloges nucléaires

Transition nucléaire dans l'UV  
=> 2 018 294 685 990 340 Hz

10 fois mieux qu'aujourd'hui, au moins !



## Pourquoi être de plus en plus précis ?

- ❑ Harrison 1750 : (0.1 s / j) => développement d'une la navigation maritime sure
- ❑ Horloges atomiques au Cs : < 1 ns / j => GPS → positionnement sur la planète à quelques cm

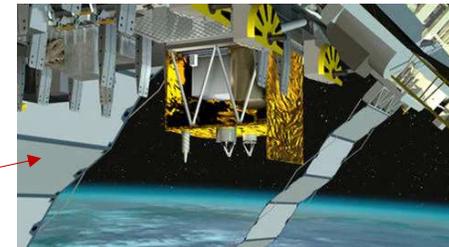
- ❑ Télécommunications, Data Center, Défense, Transport, etc

*Microchip 5071B (100 ns/mois)*



- ❑ Physique fondamentale : Relativité Général → Redshift gravitationnel  
: Variations des constantes fondamentales →  $\alpha$   
: etc

*PHARAO : Projet d'horloge atomique par refroidissement d'atomes en orbite – ISS  
(mars 2025)*



# Conclusion

- ❖ Le temps c'est une notion extrêmement riche, complexe, passionnante et mystérieuse.
- ❖ La manière dont l'être humain met en place de techniques et des idées de toute sorte pour quantifier le passage du temps est tout aussi fantastique.
- ❖ Le développements actuels et futurs des garde temps ouvrent de perspectives nouvelles dans la compréhension de notre univers.
- ❖ Bien qu'il n'existe peut être pas, le temps est ce qui indique l'horloge !