

La mesure du temps

Notions utilisées :

1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
39. Le temps (définition)

Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées

Images : Wikipédia sauf mention contraire



Alice au pays des merveilles, studios Disney, 1951

Les 3 temps des Grecs

- **Chronos** : le temps linéaire, physique, « chronologique », mesuré : jour, mois, année
- **Kairos** : le temps métaphysique, le bon moment pour agir, l'instant de l'opportunité
- **Aiôn** : le temps cyclique (cycle circadien, saisons, ...)

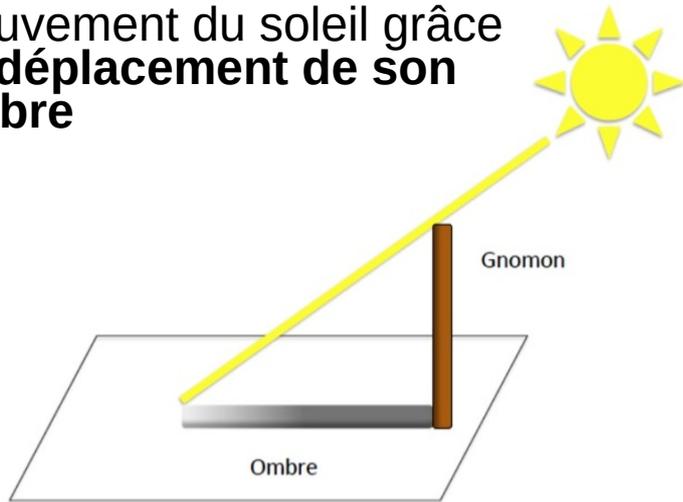


La mesure du temps

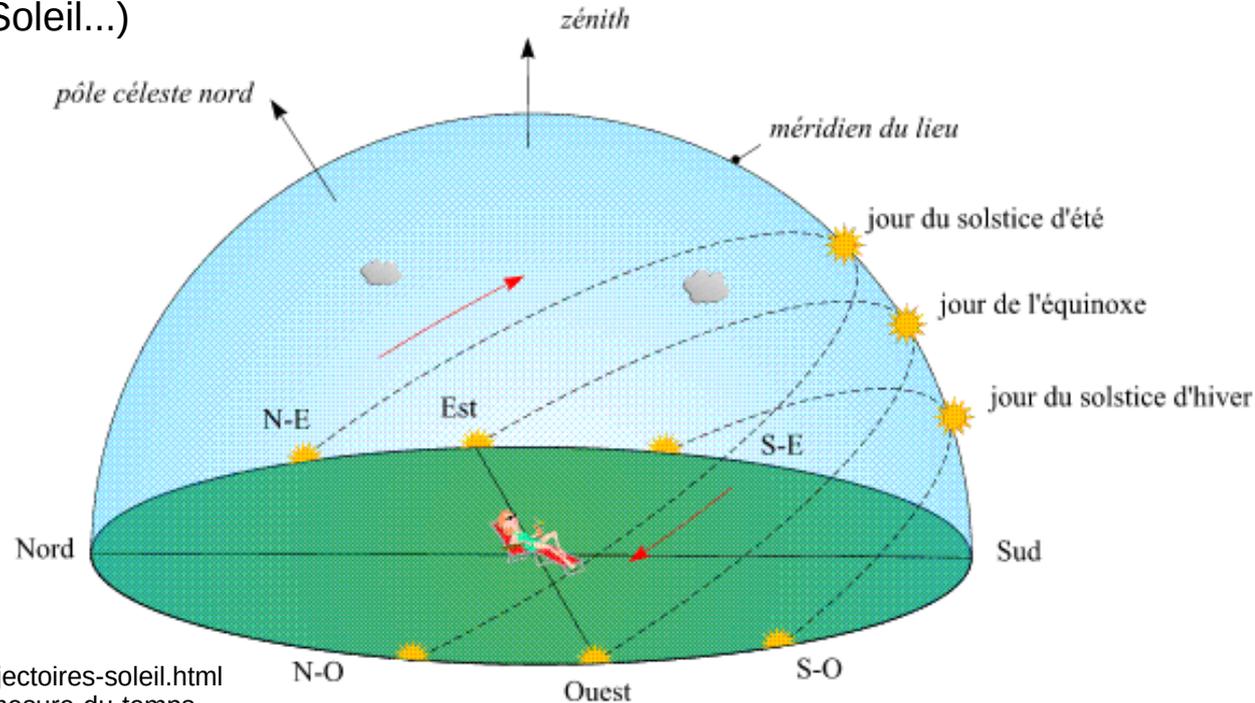
- Remonte aux premières civilisations (Babylone, Égypte)
- Pour organiser la vie des sociétés
- Premiers repères = **phénomènes périodiques** : jours, lunaisons, saisons
- Puis apparition d'appareils indépendants du mouvement apparent du Soleil
- On distingue :
 - La **détermination de l'heure** (l' « instant » en physique), avec les notions d'**antériorité** et de **postériorité**
 - La **mesure de durées** (et leur **comparaison**)
- Notion de **simultanéité**

Le gnomon

- **Gnomonique** : art de construire des cadrans solaires
- Premier instrument utilisé pour mesurer le temps
 - Bâton vertical (plutôt que regarder le Soleil...)
- Permet de visualiser le mouvement du soleil grâce au **déplacement de son ombre**



- La trajectoire apparente du Soleil varie d'un jour à l'autre
 - **Angle** : avancée du jour
 - **Longueur** : passage des saisons



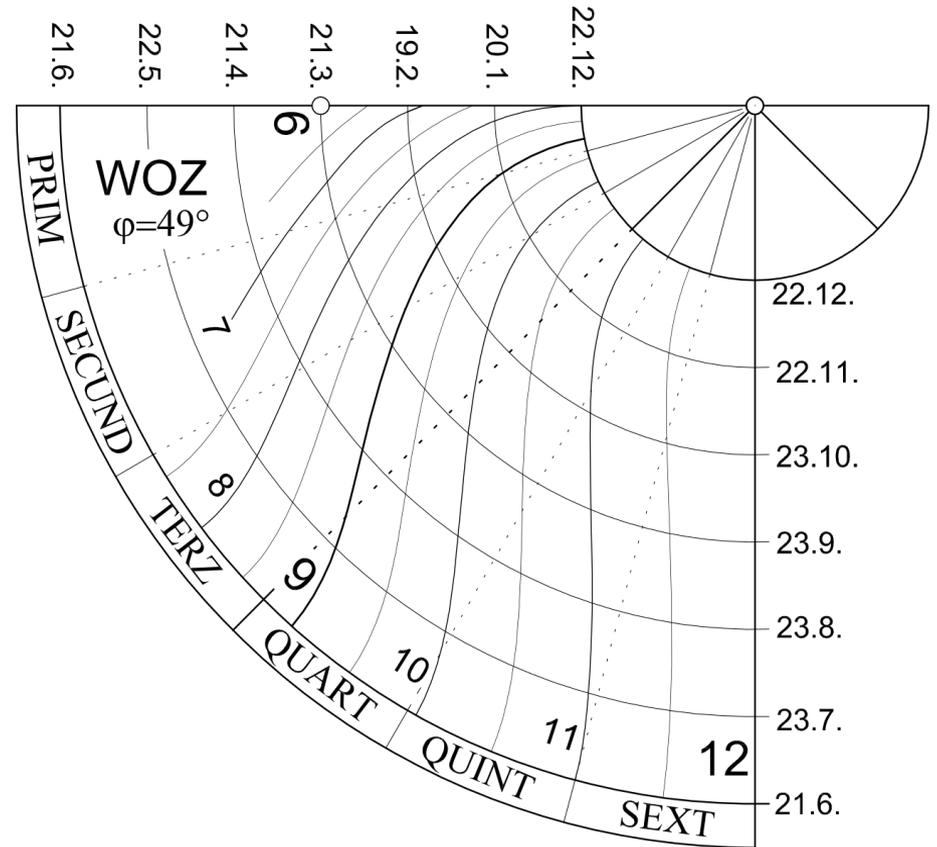
Le cadran solaire

- Instrument indiquant le temps solaire grâce à l'ombre d'un « **style** » sur une table, sur laquelle sont tracées des **graduations**
- **Complexe** à étalonner en raison du **mouvement annuel** de la Terre autour du Soleil (et de l'inclinaison de son axe de rotation)
- Plus vieux cadran solaire connu :
~ 1500 av J.C.



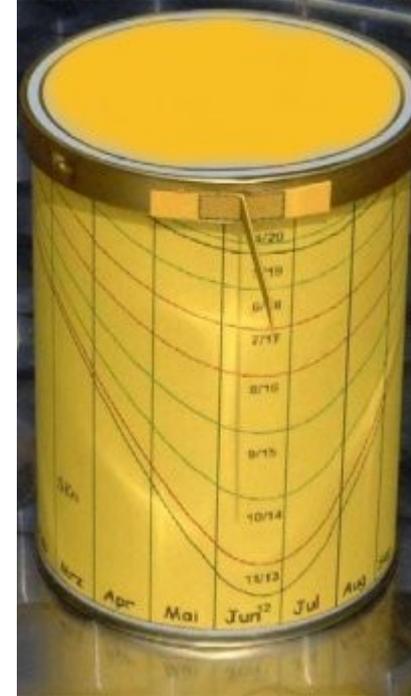
L'araignée d'azimut

- Cadran solaire + lignes d'heure ondulantes (→ « araignée »)



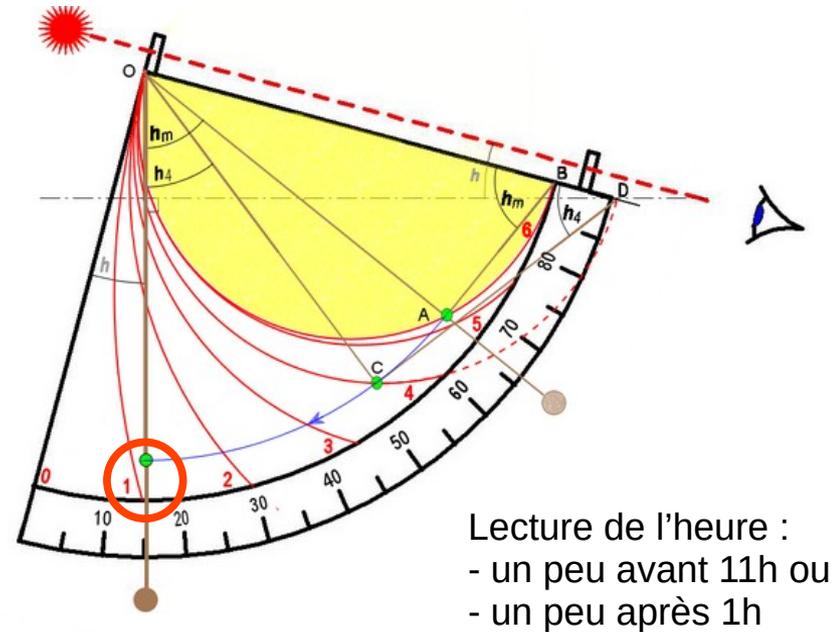
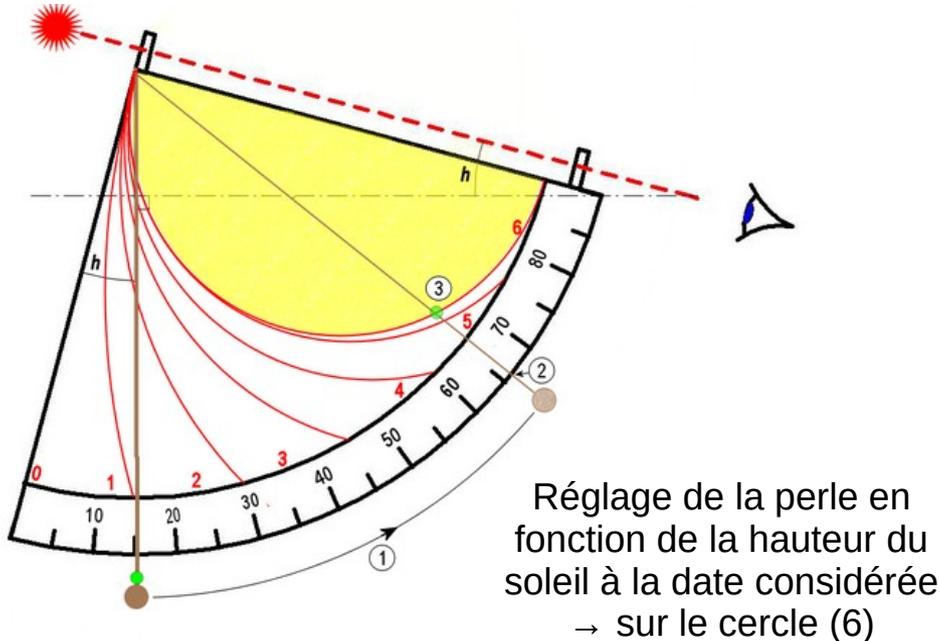
Autres dispositifs

- **Cadran de berger**
- **Anneau de paysan**, anneau solaire, cadran annulaire : réglage préalable à effectuer en fonction de la date
- Ces appareils sont **réglés pour une certaine latitude**



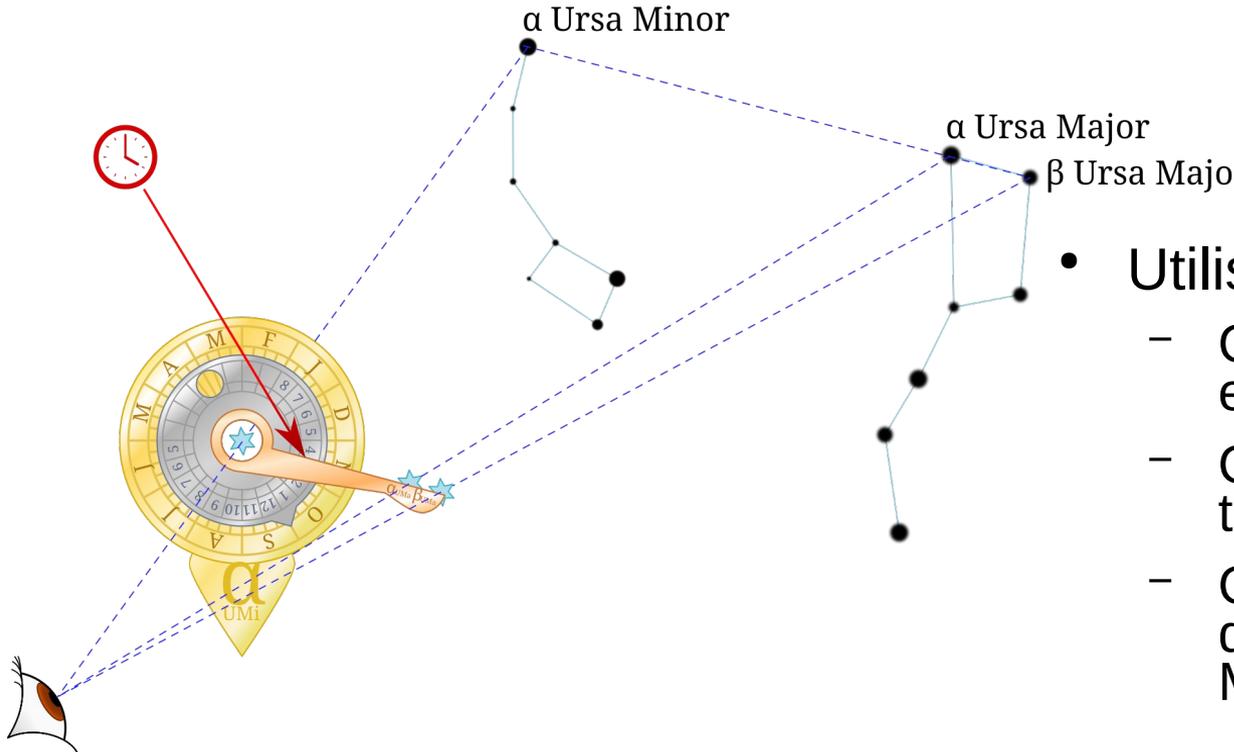
Les quadrants

- Instrument de **mesure angulaire** (hauteur) en forme de quart de cercle
- Besoin d'un **réglage dépendant de la latitude** → position de la perle (3)
- Puis lecture de la position de la perle après alignement de l'objet avec le Soleil
- Symétrie : heure de midi = 6^e ligne
 - 5^e heure \equiv 7^e heure, 4^e heure \equiv 8^e heure, etc.
 - Ici, = un peu plus d'une heure, soit ~5h avant midi ou ~5h après



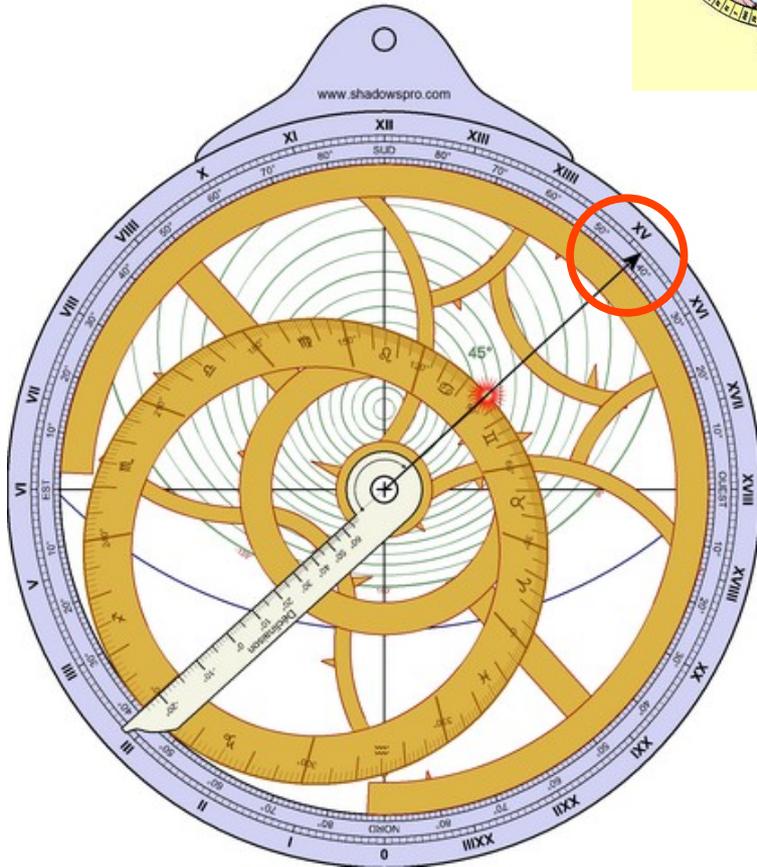
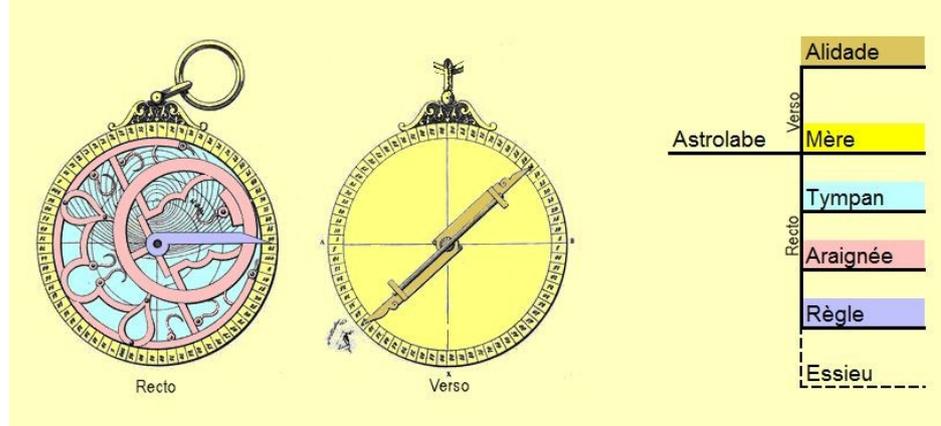
Le nocturlabe

- Utilisé pour déterminer l'écoulement du temps grâce au **mouvement des étoiles** à partir du X^e siècle
 - Applications en navigation



- Utilisation :
 - On règle la date sur le disque extérieur
 - On observe l'étoile polaire (fixe) à travers un trou au milieu
 - On ajuste le bras sur la position d'étoiles de référence (ex : Dubhe et Merak de la Grande Ourse)

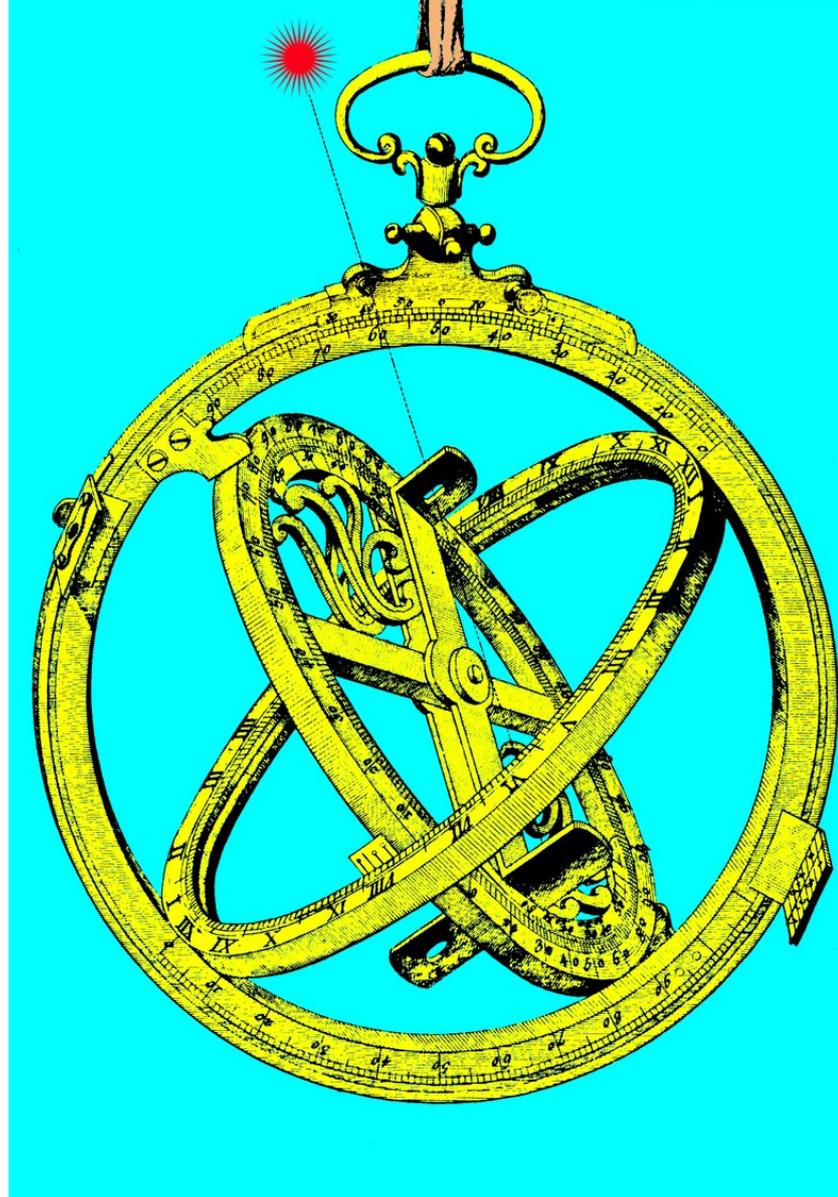
L'astrolabe



- Extension du nocturlabe : mesure la hauteur des étoiles, dont le Soleil
- Origine grecque
- Principe de mesure :
 - On suppose que la hauteur du Soleil est de 45°
 - On repère la position du Soleil sur le plan de l'écliptique (zodiaque) : ici ☊ (Cancer)
 - On positionne le point sur l'« almicantarats » correspondant sur le tympan (qui est calibré pour une certaine latitude)
 - La règle indique l'heure : 15h10

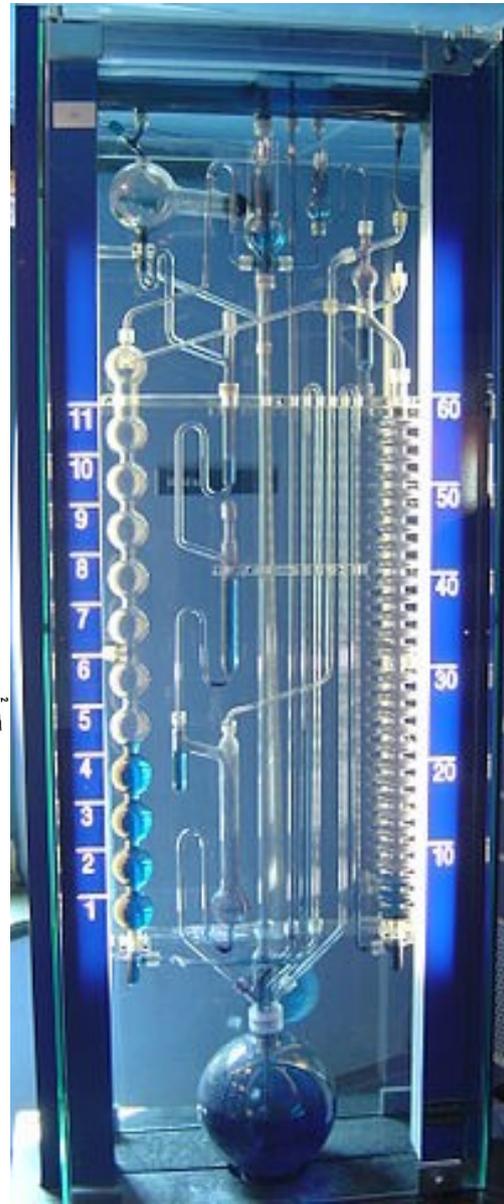
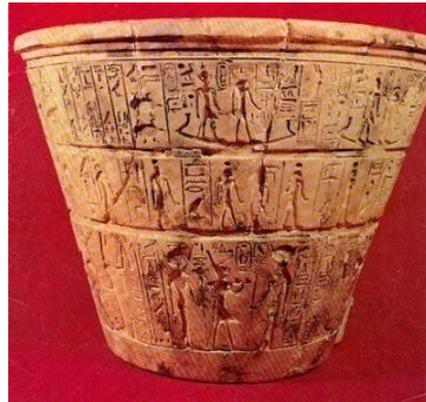
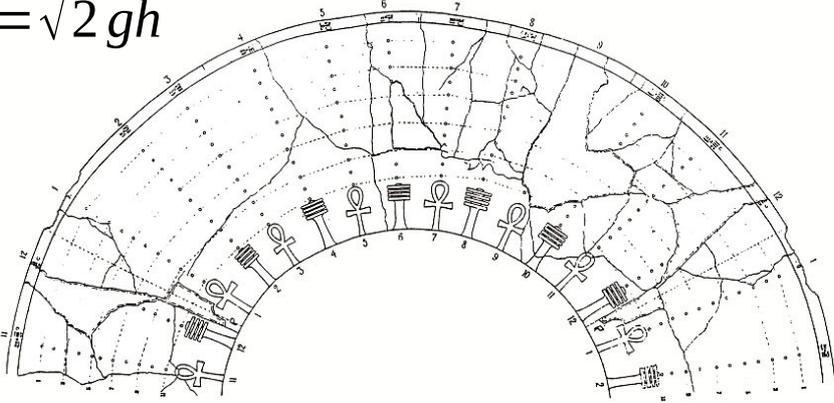
Les anneaux astronomiques

- ~ XVI^e siècle
- Exemple à 3 anneaux :
 - Extérieur (« **méridien** »): prend en compte la **latitude** (suspension)
 - Milieu (« **équatorial** ») : perpendiculaire au méridien, il est gradué en heures
 - Intérieur (« **déclinaison** ») : calendrier zodiacal ou mensuel



La clepsydre

- Instrument qui mesure le temps qui s'écoule par vidage
 - Équité des temps de parole
 - Débit d'eau irrégulier $v = \sqrt{2gh}$
- Plus ancienne clepsydre trouvée à Karnak en Égypte :
 - 1350, Amenhotep III (mais références à une utilisation dès - 1500)
- 12 graduations pour diviser la nuit en 12 parties égales à partir du coucher du soleil
- Une colonne pour chaque mois afin de prendre en compte les variations saisonnières → **heures variables** !
- Forme **tronconique** pour compenser la diminution du débit à mesure que le niveau baisse
- Ancêtre du **sablier** (quantité calibrée)

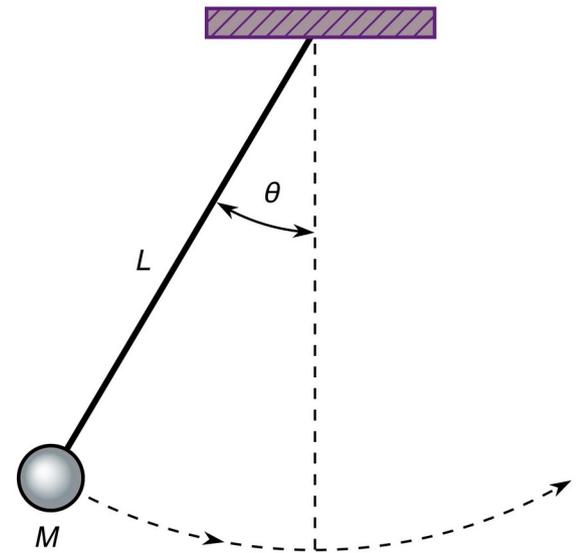


Le pendule (simple)

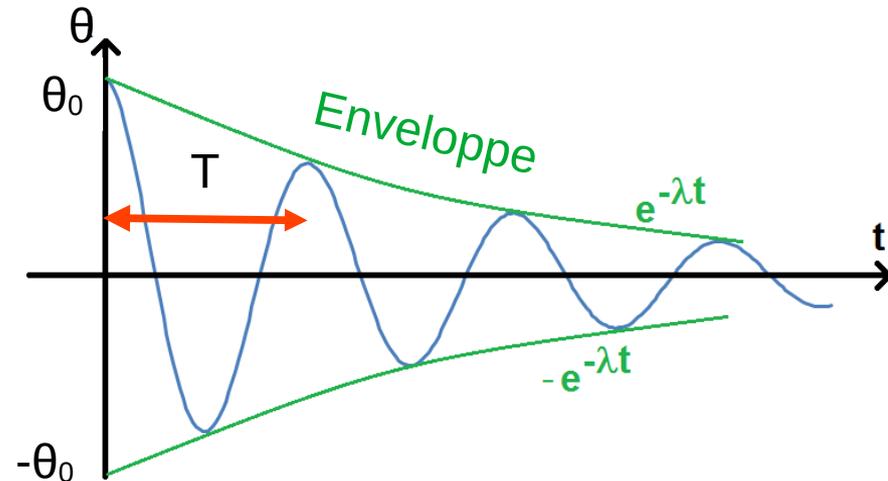
- Montage simple : masse ponctuelle au bout d'une corde/tige sans masse, qui oscille en « **régime libre** »
- **Approximation des petites oscillations** → oscillations (pseudo)périodiques de période T
- T ne dépend pas de la masse !
- Oscillations **amorties** par les frottements :

$$\theta(t) = \theta_0 \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{g}{L}} \cdot t\right) \cdot e^{-\lambda t}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

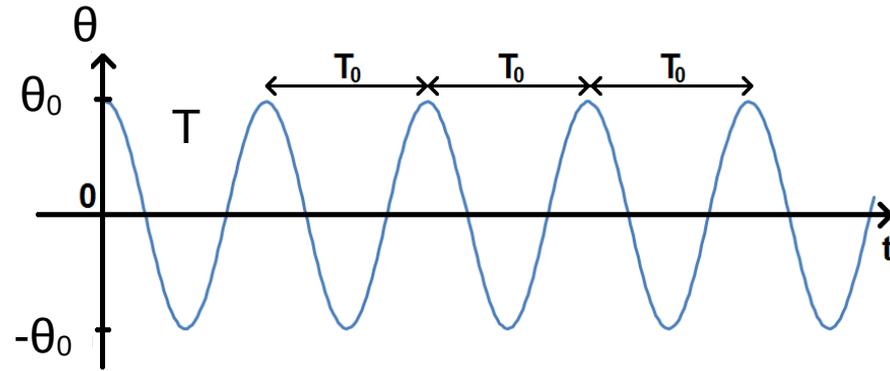
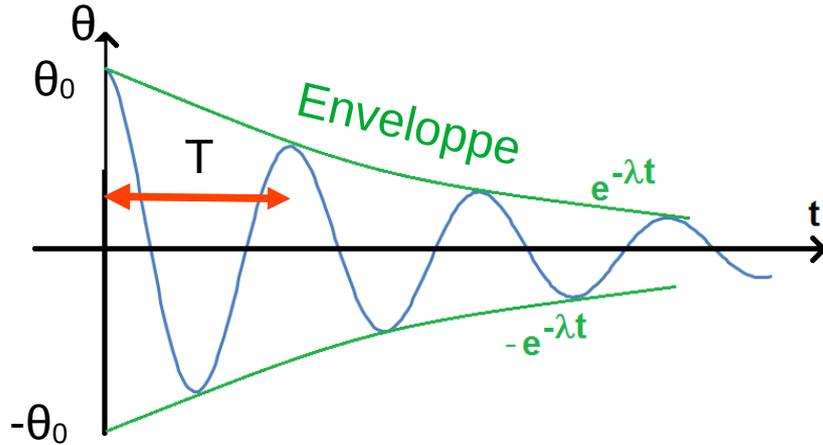


© Encyclopædia Britannica, Inc.



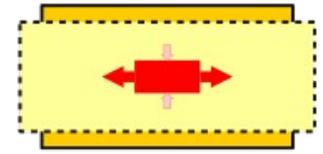
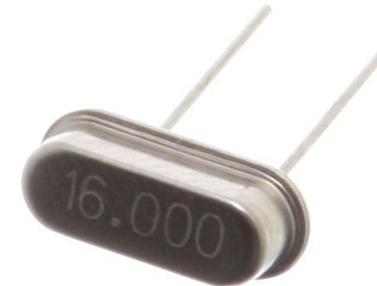
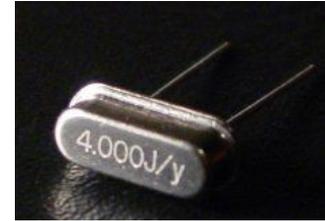
La pendule

- Période $T = 1$ seconde, mais dépend de la pression et de la température (L dépend de T)
- Mécanisme de poids pour **compenser la perte d'énergie mécanique**



Le quartz

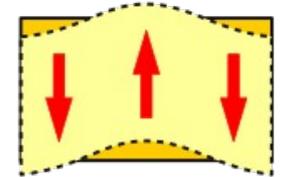
- Le quartz est composé de dioxyde de silicium (silice) SiO_2
- Composant du sable et du verre
- Il a des propriétés **piézoélectriques**
 - = capacité à transformer une **contrainte mécanique** en **polarisation électrique** :
effet direct = allume-gaz
effet inverse → utilisé dans les montres
- Un (oscillateur à) quartz oscille à une **fréquence très précise** lorsqu'on le stimule électroniquement (ex : 32768 Hz, 4 MHz, 16 MHz)
- La fréquence dépend :
 - de sa taille
 - du mode de résonance (sa forme)



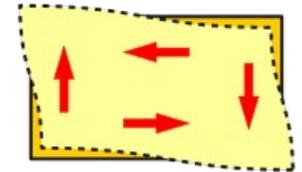
Longitudinal mode



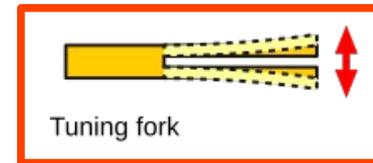
Thickness shear mode



Flexural mode



Face shear mode



Tuning fork

Les montres à quartz

- Ou « **montres électroniques** »
- Elles utilisent un « oscillateur à cristal de quartz », taillé de façon à obtenir une **fréquence de résonance précise** (mode diapason)
- Fréquence :
 - >20 KHz (sinon, produirait des sons)
 - Égale à une puissance de 2 : pour pouvoir être divisée par 2 électroniquement pour arriver à 1 Hz
 - → 2^{15} Hz = 32768 Hz
 - On trouve également 262 kHz
- Précision de base : $\sim 10^{-5}$ s.s⁻¹ ~ 1 s/jour ~ 10 s/mois
 - HAQ = High Accuracy (Q)wartz Watches : précision ~ 10 s par an (par compensation des **variations thermiques de la fréquence de résonance**), soit $\sim 10^{-6}$ s.s⁻¹



- Deux types d'affichage :
 - Électronique (LCD)
 - Mécanique (aiguilles)
 - Utilisation d'un moteur électrique pas à pas (muni d'une bobine)
 - Mouvements de la trotteuse saccadés ou ~ continus (1 – 16 mouvements par seconde)

Les montres de luxe

- « Comment se porte le marché de la montre ? »
- Président de Rolex : « Je ne sais pas, mais le marché du luxe se porte bien ! »



Montres mécaniques



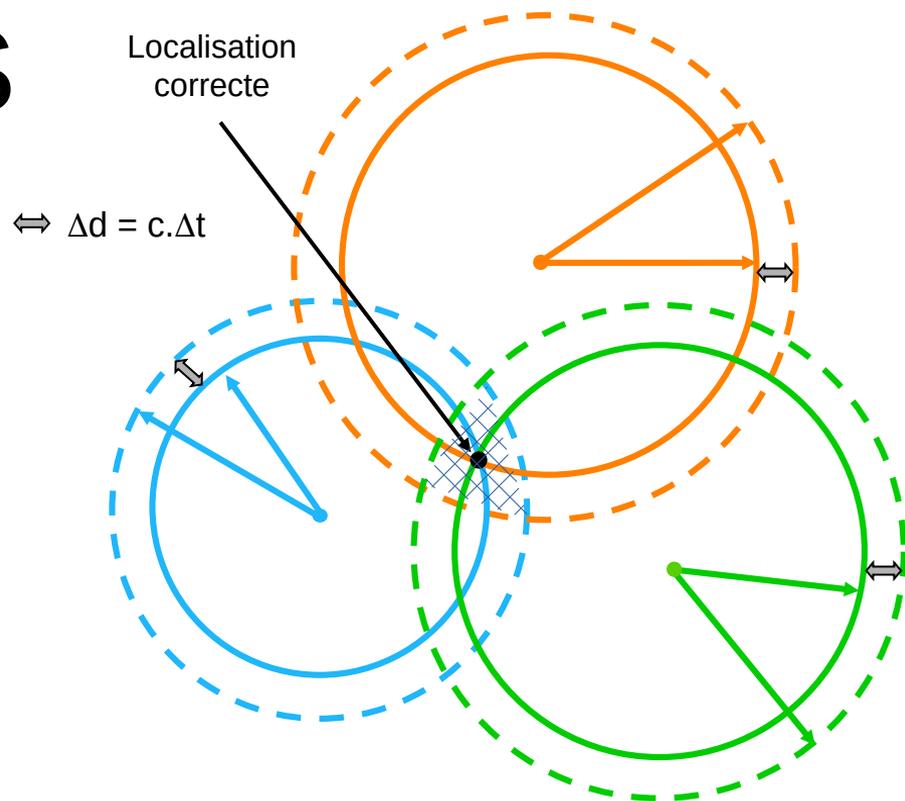
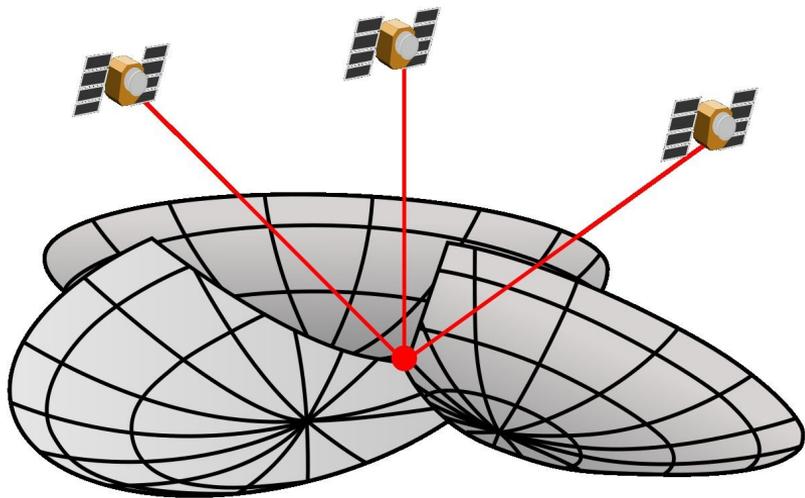
← Montre Rotonde (Cartier) « à grande complication »
Gère mois & années bissextiles – 1 réglage tous les 100 ans !

$$\text{Durée d'une année : } 365,2422 = 365 + \frac{1}{4} - \frac{1}{100} + \frac{1}{400} + \dots$$



#1 Graft Diamond Hallucination
55 000 000 \$

Synchronisation GPS



La correction du décalage Δt entre les 2 horloges permet de résoudre la contradiction apparente des mesures

Un appareil connecté au système GPS a la même précision

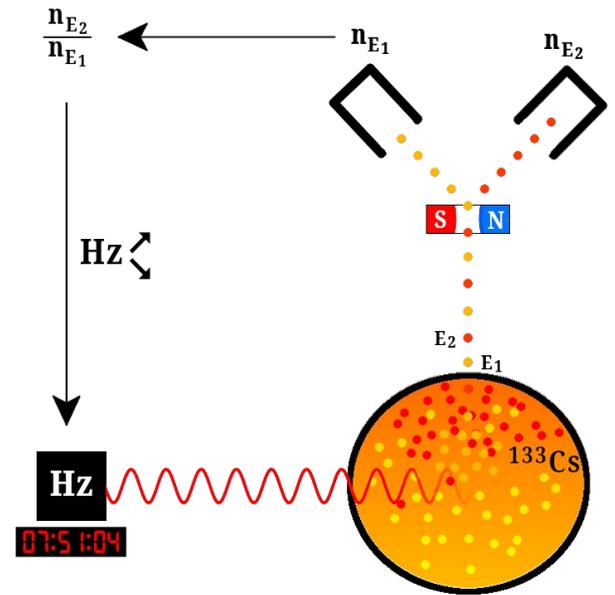
- Rappel : **distance = vitesse x temps**
 - Temps = **intervalle** entre **départ du signal** (du satellite) et **arrivée du signal** (récepteur GPS)
- Donc les horloges du GPS et du récepteur doivent être **synchronisées** ! Sinon les **distances** mesurées sont **erronées**

Les horloges atomiques

- Lorsqu'un électron change de **niveau d'énergie** dans un atome, il **émet/absorbe** une onde électromagnétique de **fréquence très précise et constante**
- Ex : césium : $\nu_0 = \Delta \nu_{Cs_{133}} = \frac{E_2 - E_1}{h} = 9912631770 \text{ Hz (ou s}^{-1}\text{)}$
- C'est la définition de la seconde adoptée en 1976 :
 - « la seconde est la durée exacte de 9 192 631 770 oscillations (ou périodes) de la transition entre les niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de ^{133}Cs (atome au repos $T = 0\text{K}$) »

Principe :

- On sélectionne des atomes de césium à l'état E_1
- Grâce à un oscillateur à quartz, on produit des micro-ondes de fréquence $\nu \approx \nu_0$, injectées dans une **cavité résonnante**
- Les atomes E_1 traversent cette cavité → passent à l'état E_2 , **d'autant plus facilement plus que $\nu \approx \nu_0$**
- En sortie, on compte les atomes E_2 , **d'autant plus nombreux que $\nu \approx \nu_0$**
- Un système d'**asservissement** (boucle de rétroaction) maximise le nombre d'atomes E_2 en adaptant la fréquence de l'horloge pour l'approcher de la fréquence optimale =



En pratique

- Précision de 10^{-14} – 10^{-16} s.s⁻¹
- Soit 1 seconde / 160 millions d'années



sparkfun
START SOMETHING

SHOP LEARN BLOG CUSTOM KITS

0 LOG IN REGISTER

PRODUCT MENU find products, tutorials, etc... Q

TODAY'S DEALS SPARKX FORUM

HOME / PRODUCT CATEGORIES / SPARKX / ATOMIC CLOCK

Miniature Atomic Clock
US PARTS & SUPPLIES
PART NO. 090-44300-02

Microsemi

Atomic Clock

SPX-14830

\$1,995.00

We do not currently have an estimate of when this product will be back in stock. [Notify Me](#)

1 **NOT AVAILABLE FOR BACKORDER**

Stock availability

DESCRIPTION FEATURES DOCUMENTS

The Miniature Atomic Clock (MAC) from Microsemi uses a rubidium laser to output an extremely accurate clock. We're speaking at the edge of our knowledge so please bear with us but the short-term stability (Allan Deviation) is $\leq 8 \cdot 10^{-12}$. From Wikipedia on [Atomic Clocks](#):

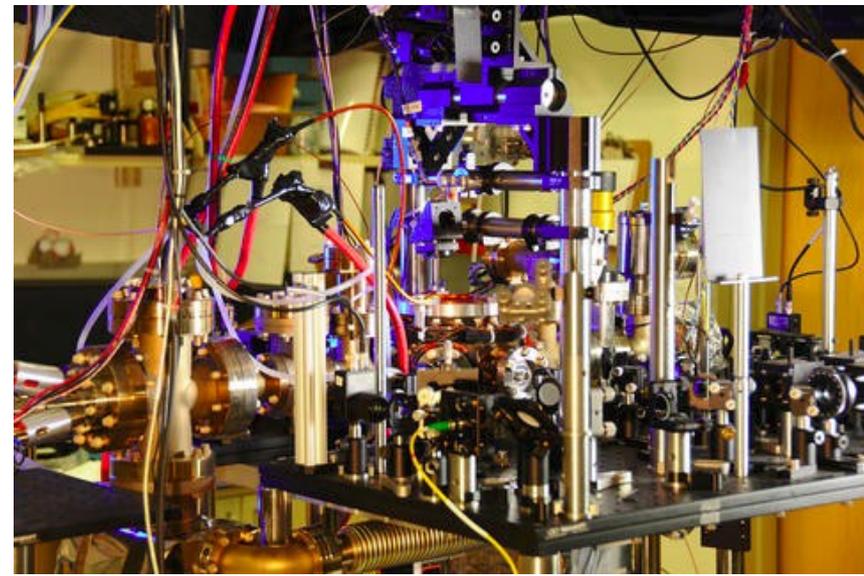
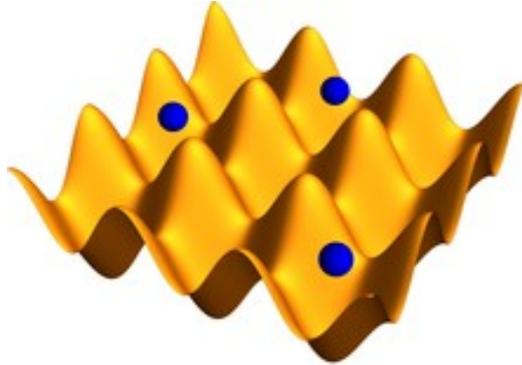
For context, a femtosecond (1×10^{-15} s) is to a second what a second is to about 31.71 million (31.71×10^6) years and an attosecond (1×10^{-18} s) is to a second what a second is to about 31.71 billion (31.71×10^9) years.

<https://www.sparkfun.com/products/14830>

<https://www.microchip.com/en-us/products/clock-and-timing/components/atomic-clocks>

Les horloges optiques

- « Horloge atomique aux fréq. optiques »
- Plutôt que d'utiliser des fréquences de qq GHz, on utilise des fréquences optiques (10^{15} Hz, soit 100 000 fois plus élevées)
- On **piège** des atomes dans des « **treillis optiques** » formés par des lasers afin de les « **refroidir** » (méthode d'obtention de très basses températures)
→ **amélioration de la précision**



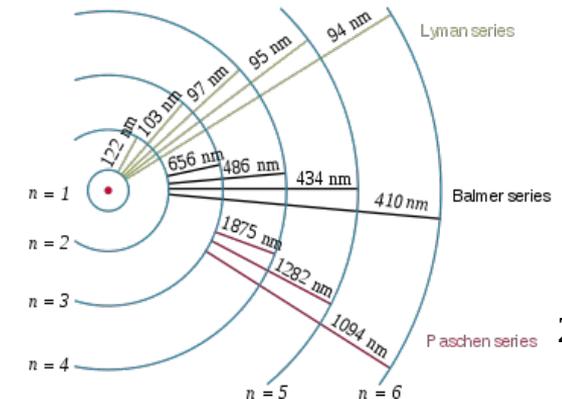
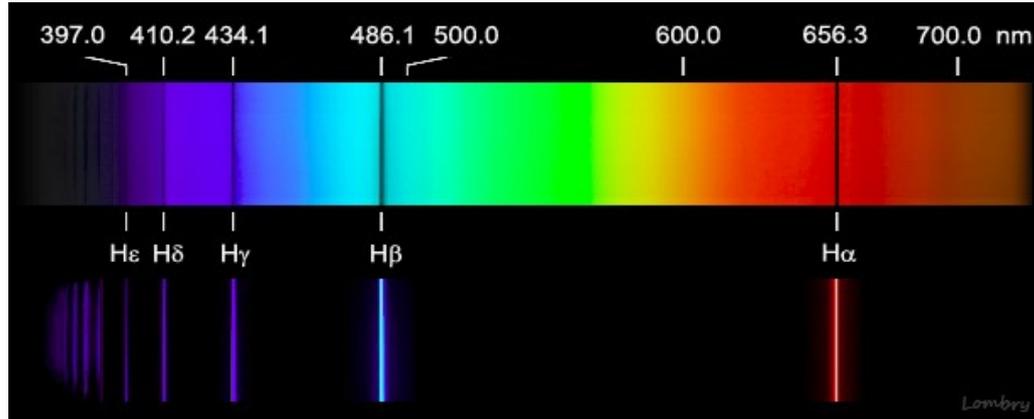
horloge atomique à l'ytterbium (^{70}Yb), d'une précision de 10^{-18}

- Record $\approx 10^{-19}$ s.s $^{-1}$, soit 1 seconde en 30 milliards d'années
- 10^{13} = 10 000 000 000 000 de fois plus précise qu'une montre à quartz
- Horloges suffisamment précises pour que les effets de la RG se fassent sentir lors d'une **variation d'altitude d'un millimètre**

Structure du noyau atomique

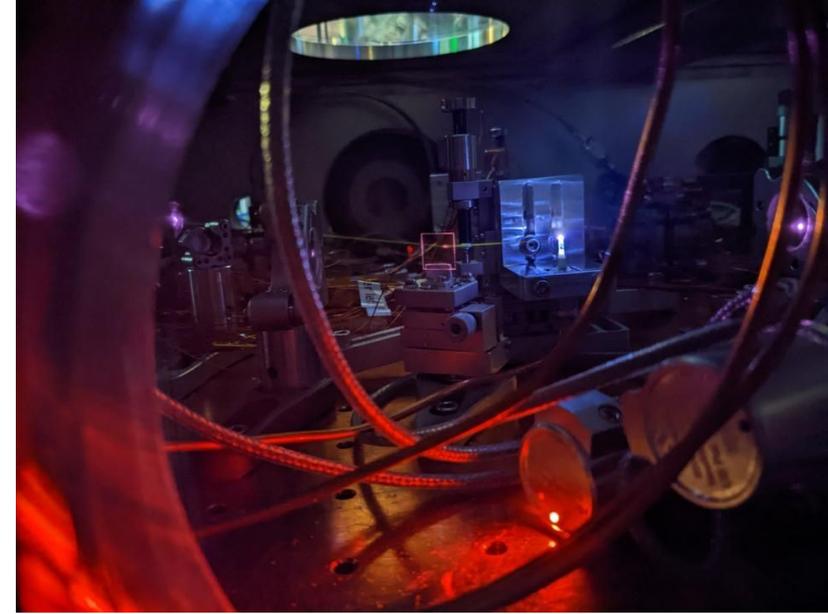
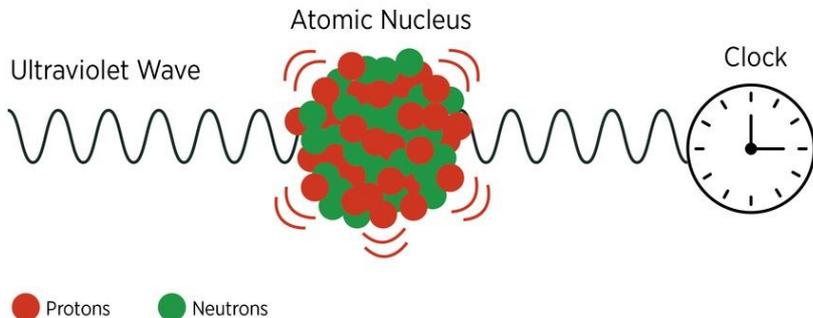
- Le modèle en couches du noyau est **similaire à celui de l'atome (électrons)** → PNP 1963
 - Explique **stabilité des noyaux** : structure (not. différence d'énergie entre couches) et remplissage des couches
 - nombres magiques = couches complètes = atomes particulièrement stables : 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126
- Il existe des énergies de transition / d'excitation & désexcitation = rayons γ (par définition)
 - « **spectre nucléaire** » (spectrométrie gamma)

| | | | |
|-------------------------|----------|--------------------------------------|--------------------------|
| Sous-couche $1s_{1/2}$ | 2 états | → 1 ^{er} nombre magique = 2 | |
| Sous-couche $1p_{3/2}$ | 4 états | | nombre semi-magique : 6 |
| Sous-couche $1p_{1/2}$ | 2 états | → 2 ^e nombre magique = 8 | |
| Sous-couche $1d_{5/2}$ | 6 états | | nombre semi-magique : 14 |
| Sous-couche $2s_{1/2}$ | 2 états | | nombre semi-magique : 16 |
| Sous-couche $1d_{3/2}$ | 4 états | → 3 ^e nombre magique = 20 | |
| Sous-couche $1f_{7/2}$ | 8 états | → 4 ^e nombre magique = 28 | |
| Sous-couche $2p_{3/2}$ | 4 états | | nombre semi-magique : 32 |
| Sous-couche $1f_{5/2}$ | 6 états | | nombre semi-magique : 38 |
| Sous-couche $2p_{1/2}$ | 2 états | | nombre semi-magique : 40 |
| Sous-couche $1g_{9/2}$ | 10 états | → 5 ^e nombre magique = 50 | |
| Sous-couche $1g_{7/2}$ | 8 états | | nombre semi-magique : 58 |
| Sous-couche $2d_{5/2}$ | 6 états | | nombre semi-magique : 64 |
| Sous-couche $2d_{3/2}$ | 4 états | | nombre semi-magique : 68 |
| Sous-couche $3s_{1/2}$ | 2 états | | nombre semi-magique : 70 |
| Sous-couche $1h_{11/2}$ | 12 états | → 6 ^e nombre magique = 82 | |



Les horloges nucléaires

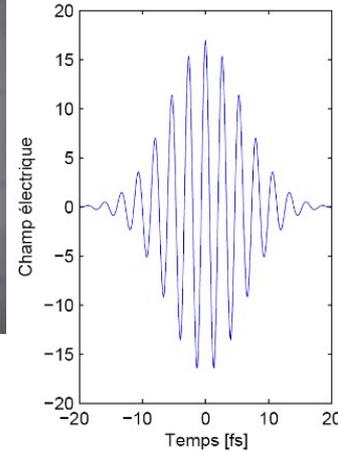
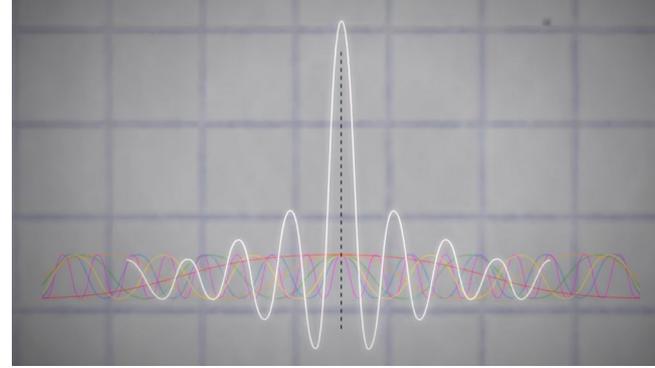
- **Moins sensibles aux conditions extérieures** que les horloges atomiques
 - Not. champs électromagnétiques
- On utilise du Thorium 229 : on peut exciter son noyau (= le faire basculer entre 2 états) avec un laser UV
 - En comptant précisément ces changements d'énergie, on peut créer un dispositif de chronométrage extrêmement précis.
 - Problème technique : créer un laser UV qui a exactement la bonne fréquence



- Pour l'instant **moins précises** que les horloges atomiques mais **inversion** prédite d'ici quelques années

Lasers femtoseconde

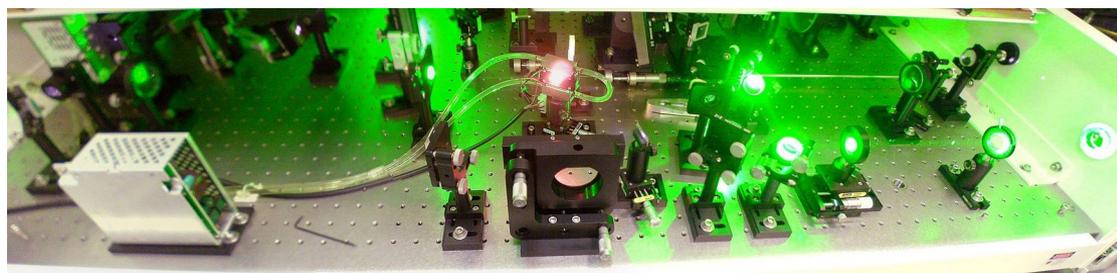
- Années 80-90, PNP 2018
- (Premier laser : 1960)
- Lasers produisant des impulsions de très courte durée : $\sim 1 \text{ fs} - 1 \text{ ps} = 10^{-15} - 10^{-12} \text{ s}$
 - En 1 fs, la lumière parcourt $0,3 \mu\text{m}$
~ taille d'un virus
 - Puissance = énergie/durée \rightarrow élevée
- La durée de l'impulsion doit être **au moins égale à une période optique**
 - $400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm} \Leftrightarrow 1,3 \text{ fs} < T < 2,6 \text{ fs}$,
 - soit ~ la période d'une OEM dans le visible
- Impulsion = superposition d'ondes (en phase) de longueur d'ondes différentes



• Utilisations :

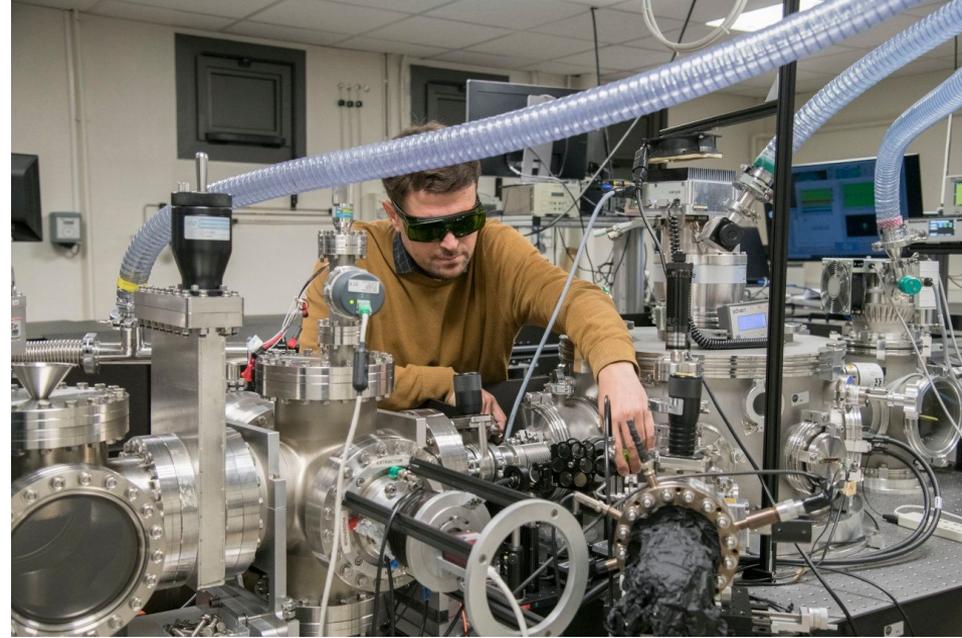
- Faible durée \rightarrow pas d'effets thermiques
- En chirurgie ophtalmologique
- Étude de la rupture d'un brin d'ADN ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$)
- Dans l'industrie

Pour en savoir plus :
<https://youtu.be/l2qzET6woOg>



Lasers attoseconde

- Une **attoseconde** = un milliardième de milliardième de seconde (10^{-18} s) = échelle de temps naturelle du **mouvement de l'électron**
 - Durée d'une orbite autour d'un noyau \approx 150 attosecondes
 - Autant d'attosecondes dans une seconde que de secondes dans l'âge de l'Univers
 - En 1 as, la lumière parcourt $0,3 \text{ nm} = 3 \text{ \AA}$
- Durée de l'impulsion $< 1 \text{ fs}$ \rightarrow périodes de la lumière visible trop courtes \rightarrow **UV / X** = « XUV »
- Problème : le laser est créé par des atomes/molécules \rightarrow ces longueurs d'ondes ne peuvent être générées \rightarrow traitement « post-laser »
 - 1987 (CEA) : processus de « **création d'harmoniques d'ordre élevé** » par illumination d'un gaz/plasma puis réémission
- Prix Nobel 2023 pour la **génération** et la **mesure** (technique « RABBIT » pour « Reconstruction d'un battement attoseconde par interférence de transitions à deux photons »)



- On a donc à la fois des **courtes durées** et des **courtes longueurs d'ondes**
- Permet de **sonder la matière à petite échelle**, notamment la **dynamique des électrons** dans la matière.
- Applications : étudier les **processus électroniques** dans de nombreux domaines (physique, chimie, médecine, industrie, – e.g. électronique), des corps les plus simples (dihydrogène) aux plus complexes (protéines), impossibles à décrire analytiquement

Addendum

De nouveaux préfixes ont été créés en 2022

| Nom ↕ | Symbole ↕ | Date ↕ | Puissance | | Notation décimale ↕ | Nom ↕ | Symbole ↕ | Date ↕ | Puissance | | Notation décimale ↕ |
|---------|-----------|--------|-----------|----------------|--|---------|-----------|-------------------|------------|-----------------|---|
| | | | de 10 ↕ | de 1 000 ↕ | | | | | de 10 ↕ | de 1 000 ↕ | |
| Quetta | Q | 2022 | 10^{30} | $1\ 000^{10}$ | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | (aucun) | — | — | 10^0 | $1\ 000^0$ | 1 |
| Ronna | R | 2022 | 10^{27} | $1\ 000^9$ | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Déci | d | 1795 | 10^{-1} | $1\ 000^{-1/3}$ | 0,1 |
| Yotta | Y | 1991 | 10^{24} | $1\ 000^8$ | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Centi | c | 1795 | 10^{-2} | $1\ 000^{-2/3}$ | 0,01 |
| Zetta | Z | 1991 | 10^{21} | $1\ 000^7$ | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Milli | m | 1795 | 10^{-3} | $1\ 000^{-1}$ | 0,001 |
| Exa | E | 1975 | 10^{18} | $1\ 000^6$ | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Micro | μ | 1960 ^d | 10^{-6} | $1\ 000^{-2}$ | 0,000 001 |
| Péta | P | 1975 | 10^{15} | $1\ 000^5$ | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Nano | n | 1960 | 10^{-9} | $1\ 000^{-3}$ | 0,000 000 001 |
| Téra | T | 1960 | 10^{12} | $1\ 000^4$ | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Pico | p | 1960 | 10^{-12} | $1\ 000^{-4}$ | 0,000 000 000 001 |
| Giga | G | 1960 | 10^9 | $1\ 000^3$ | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Femto | f | 1964 | 10^{-15} | $1\ 000^{-5}$ | 0,000 000 000 000 001 |
| Méga | M | 1960 | 10^6 | $1\ 000^2$ | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Atto | a | 1964 | 10^{-18} | $1\ 000^{-6}$ | 0,000 000 000 000 000 001 |
| Kilo | k | 1795 | 10^3 | $1\ 000^1$ | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Zepto | z | 1991 | 10^{-21} | $1\ 000^{-7}$ | 0,000 000 000 000 000 000 001 |
| Hecto | h | 1795 | 10^2 | $1\ 000^{2/3}$ | 100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Yocto | y | 1991 | 10^{-24} | $1\ 000^{-8}$ | 0,000 000 000 000 000 000 000 001 |
| Déca | da | 1795 | 10^1 | $1\ 000^{1/3}$ | 10 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Ronto | r | 2022 | 10^{-27} | $1\ 000^{-9}$ | 0,000 000 000 000 000 000 000 000 001 |
| (aucun) | — | — | 10^0 | $1\ 000^0$ | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 | Quecto | q | 2022 | 10^{-30} | $1\ 000^{-10}$ | 0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 001 |