

# Introduction à l'horlogerie mécanique

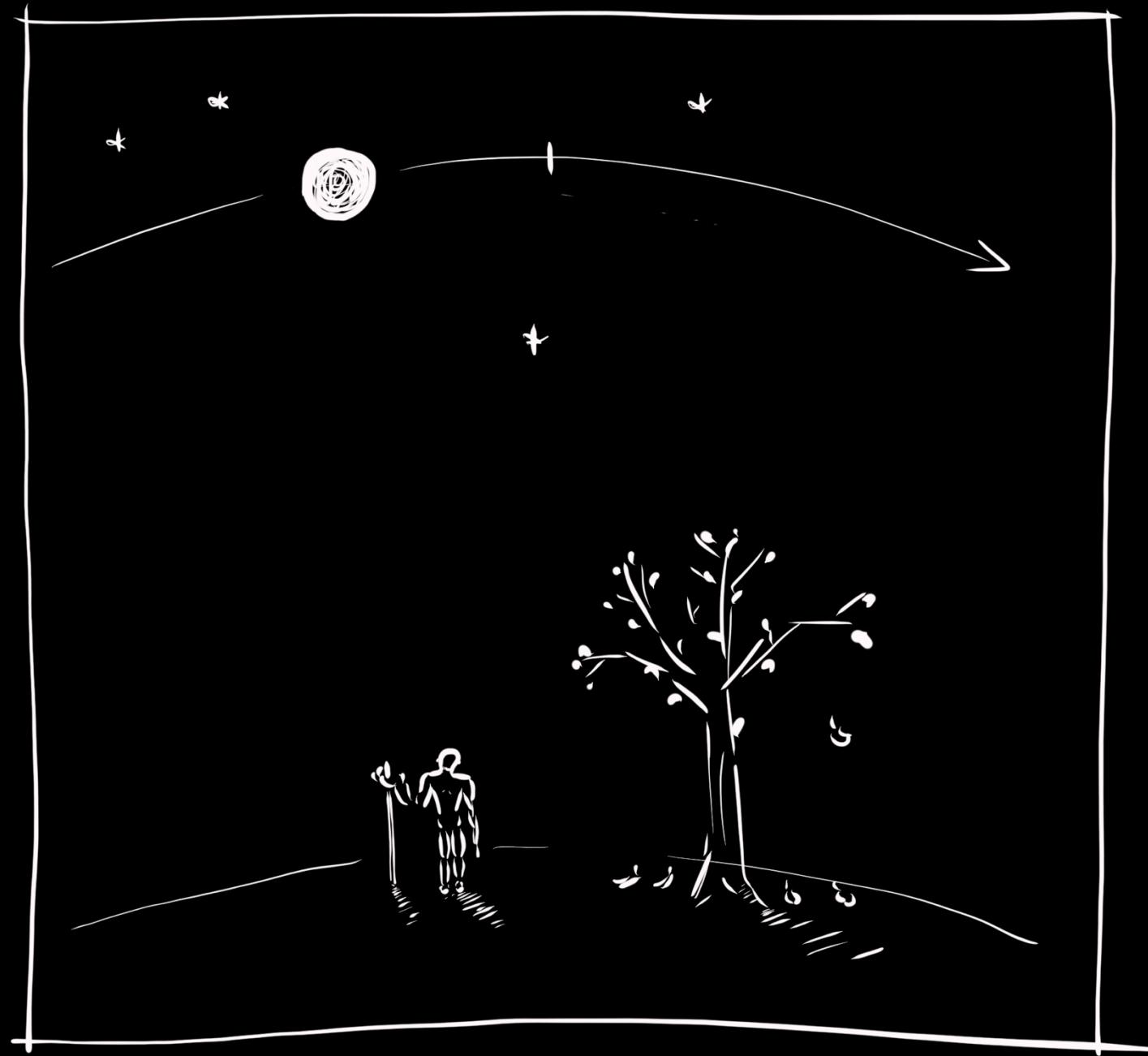
Conception de mécanismes II (MICRO-201)

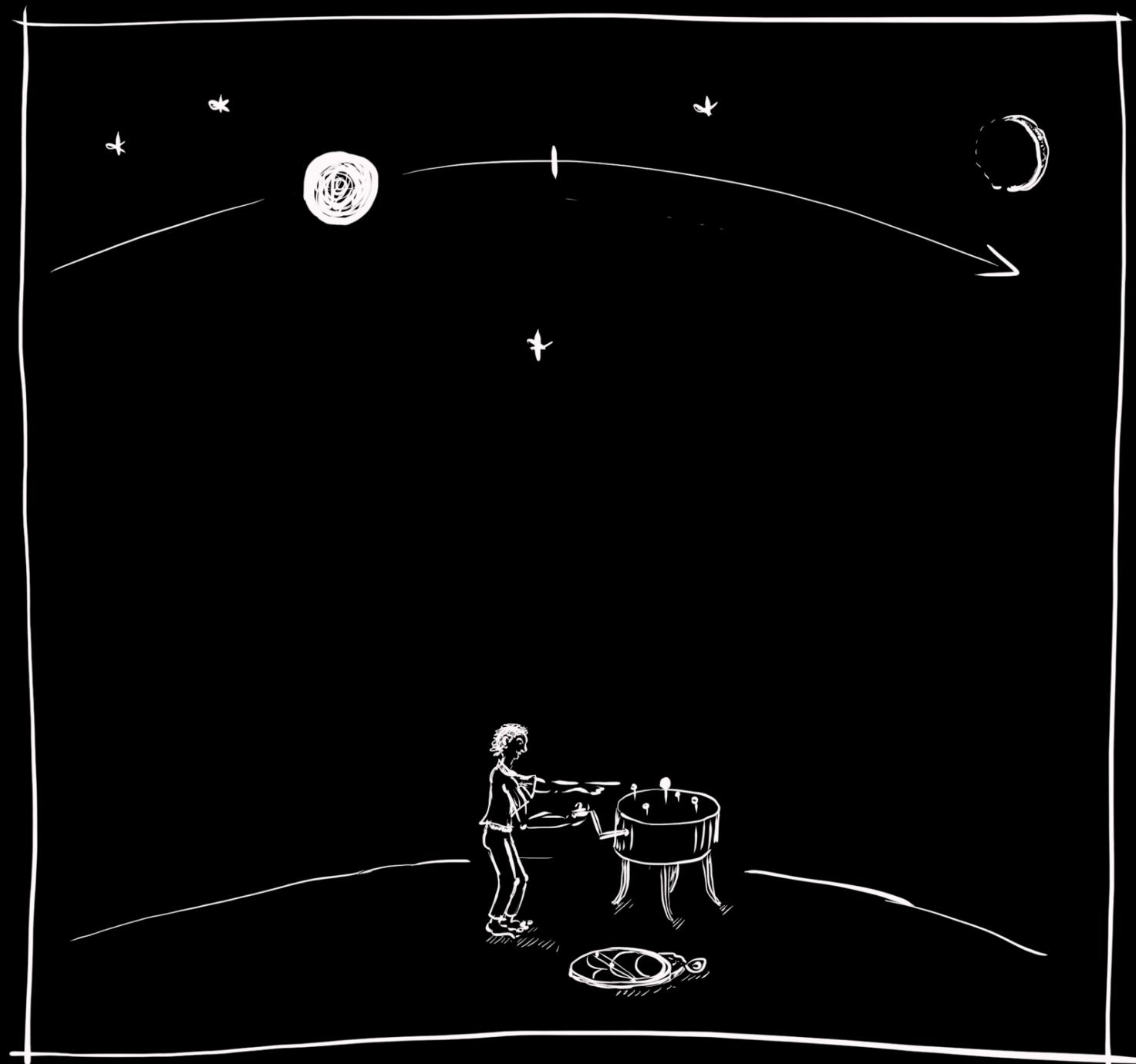
Prof. Simon Henein

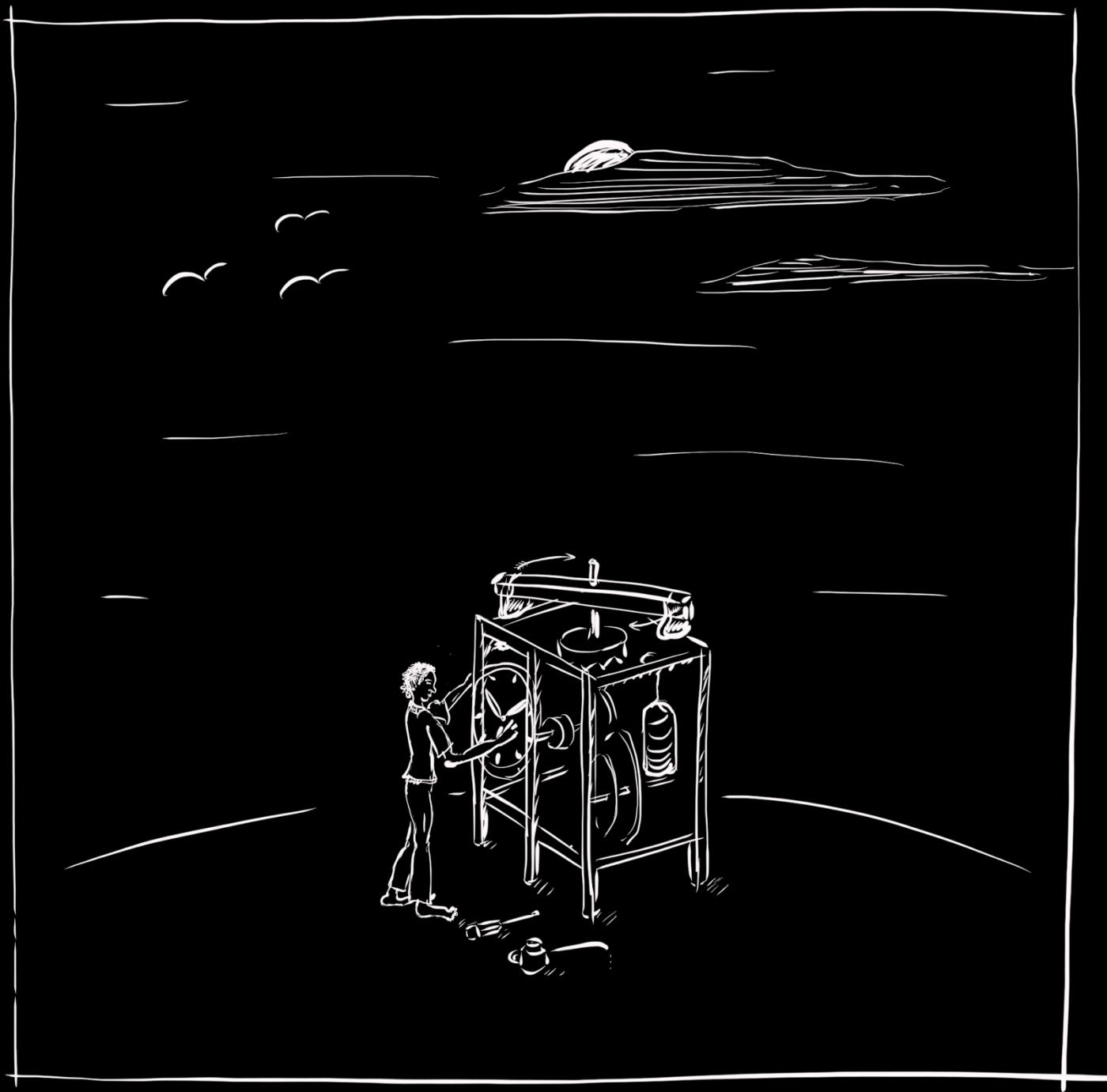
Instant-Lab, EPFL

# Plan

- Garde temps
  - Définition
  - Aspects historiques
  - Isochronisme
  - Aspects énergétiques
- Organes clés
  - Base de temps
  - Accumulateur d'énergie
  - Le rouage
  - L'échappement
  - Fonctions additionnelles
    - Remontage automatique
    - Complications
- Aperçu de la montre électronique
- Exercices



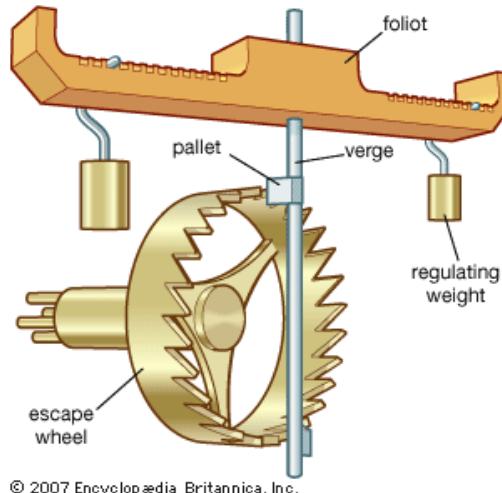




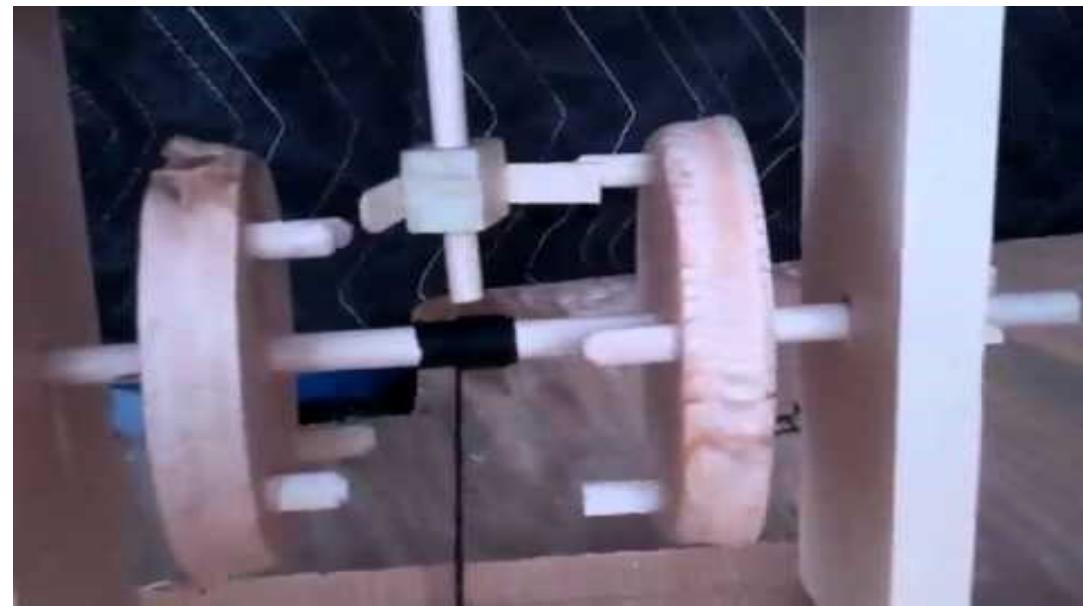
XIII<sup>e</sup>

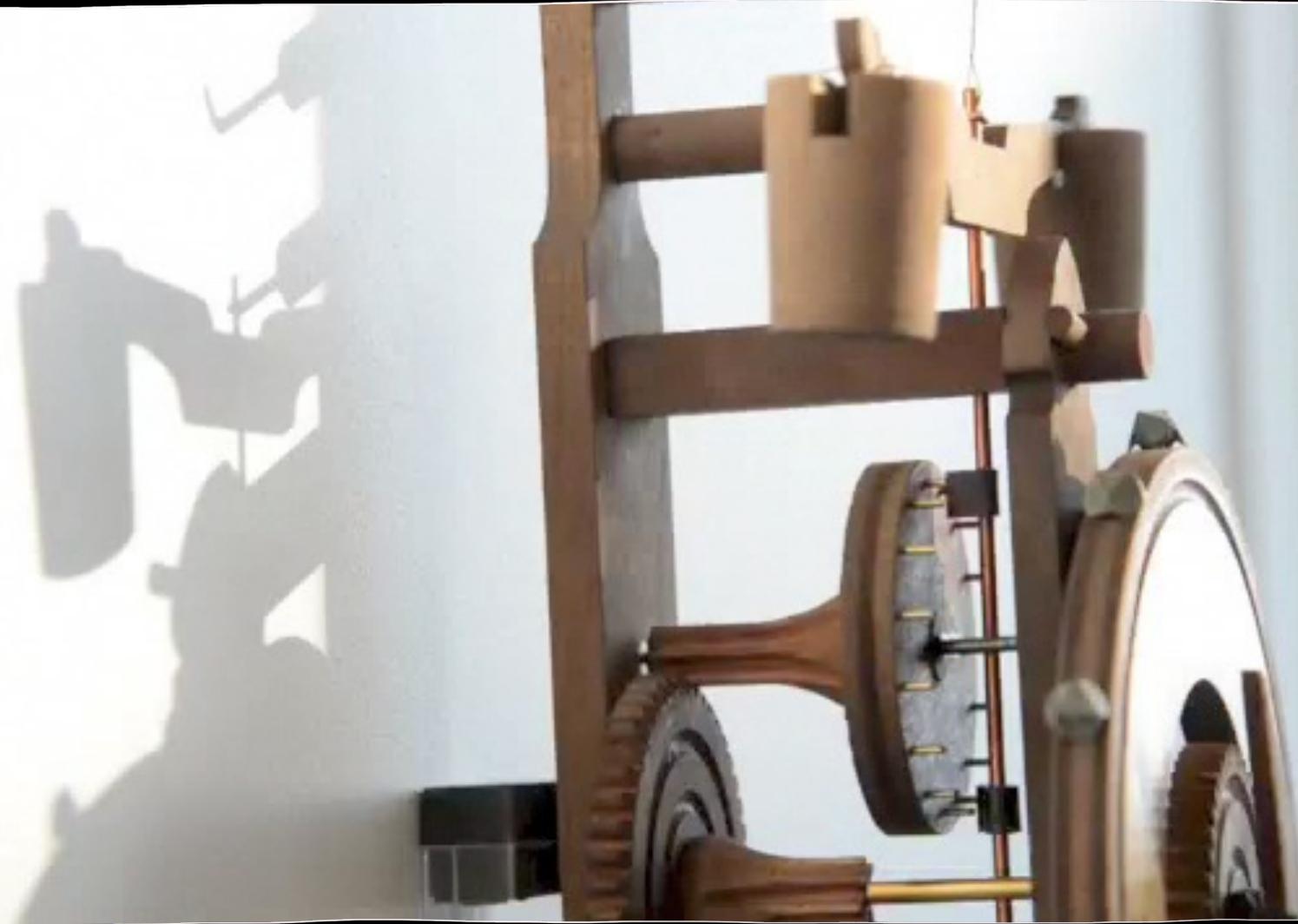
## Les premières horloges, dès le XIII<sup>e</sup> siècle

- Régulateur: foliot
- Échappement à verge
- Non-isochrone (la fréquence dépend de la force motrice)  
Erreur chronométrique: environ 15 minutes/jour



© 2007 Encyclopædia Britannica, Inc.



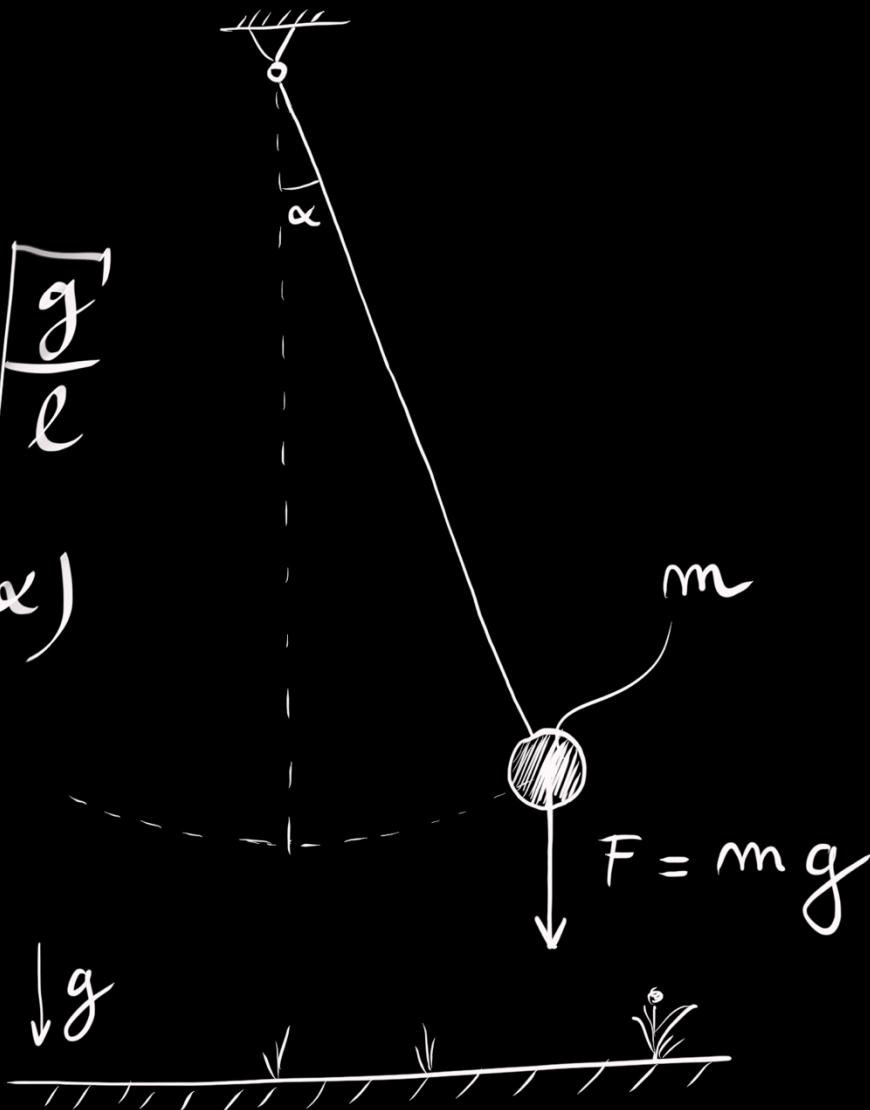


XIII<sup>e</sup>



$$f \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

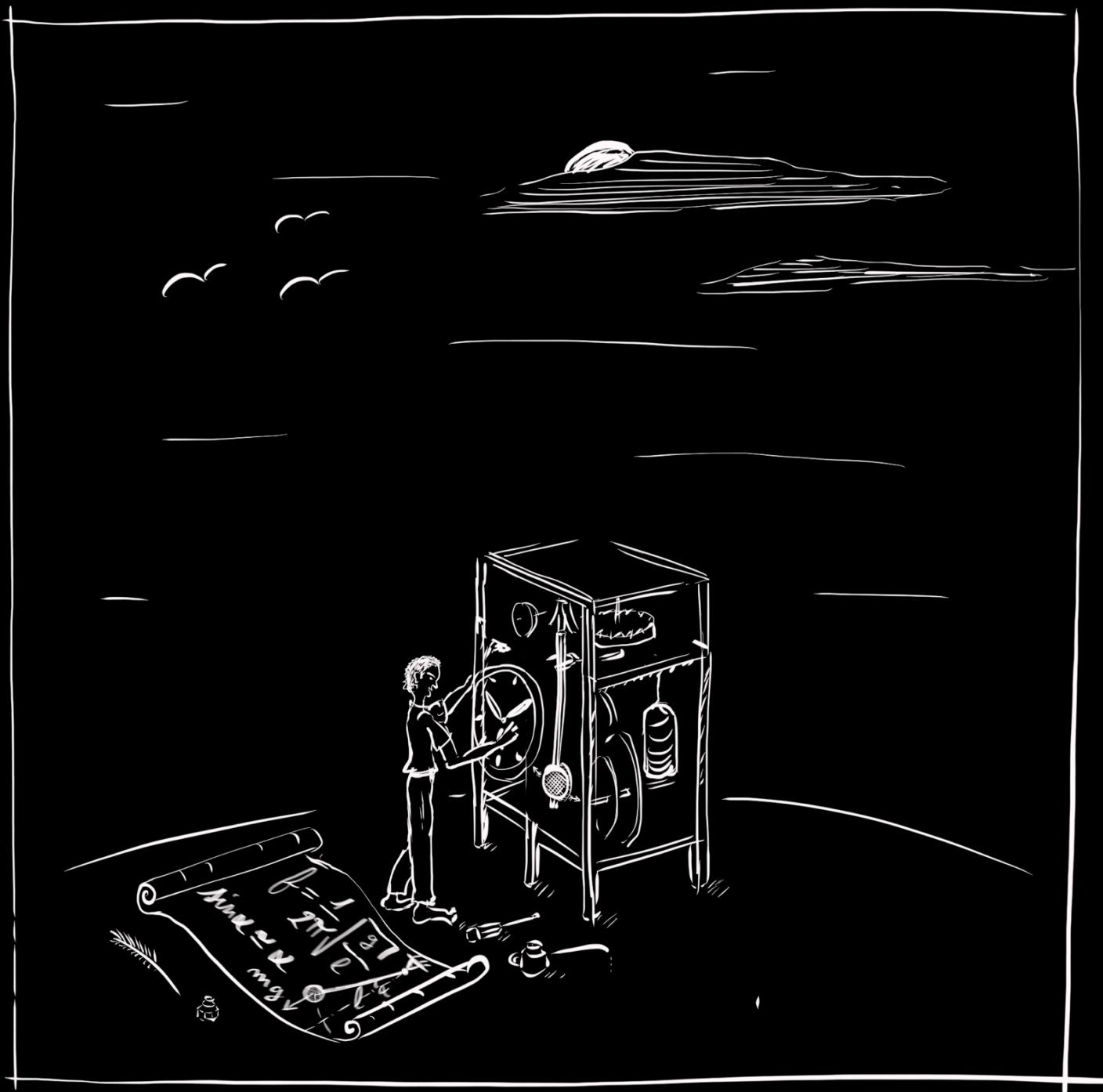
$$(\sin \alpha \approx \alpha)$$



Isochronisme:

Galilée, 1602

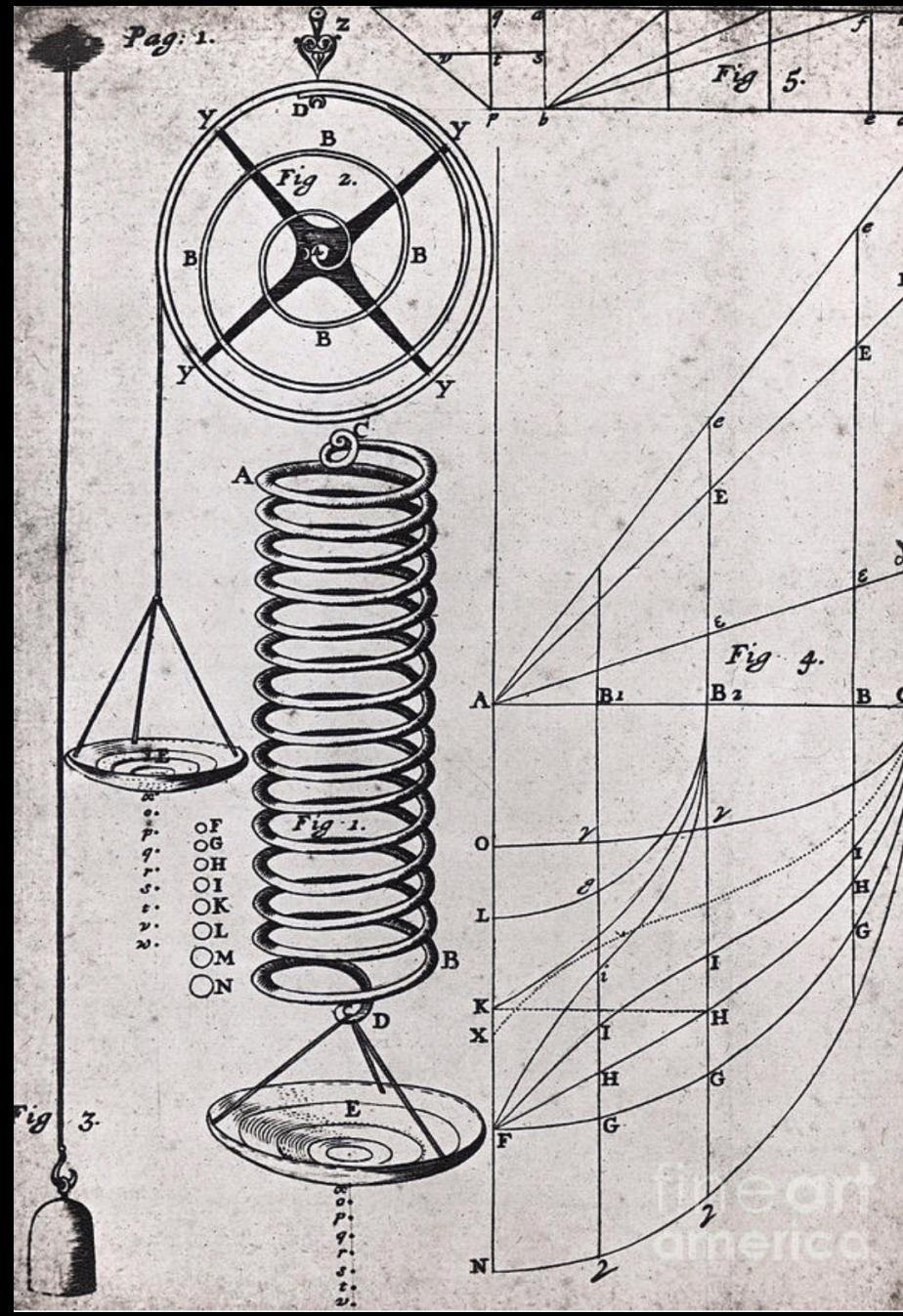
Huygens, 1656



“ceiiinosssttuu”

*“ut tensio, sic vis”*

Hooke  
1676



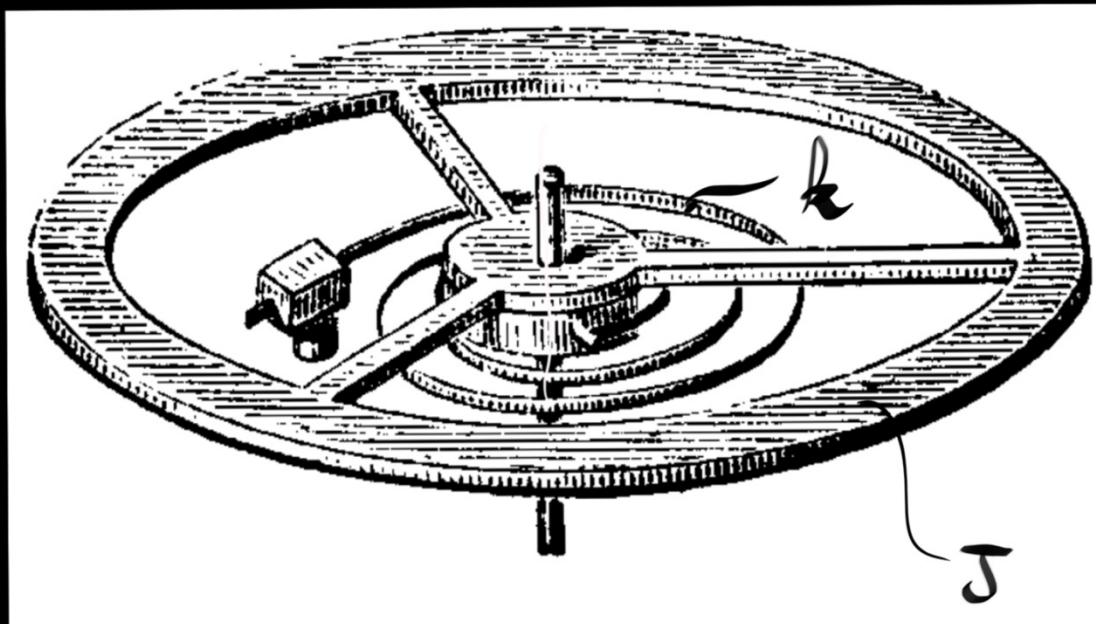
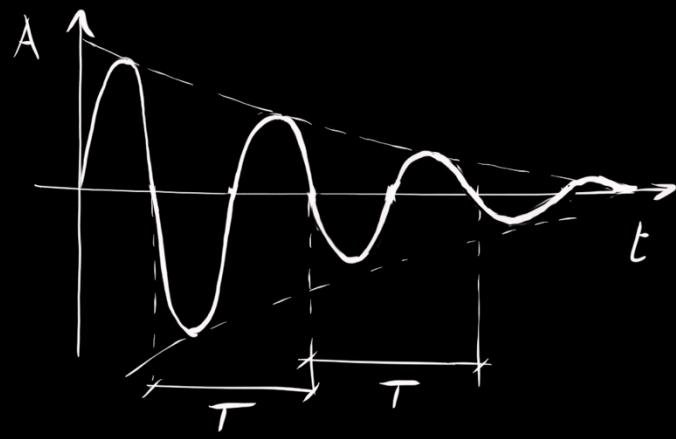


Fig. 820. — Ressort spiral.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{J}}$$



Huygens &  
Hooke  
c.a. 1675

# Introduction du « temps civil »

**1602.** Galilée observe l'isochronisme du pendule et dessine une horloge.

**25 décembre 1656.** Huygens invente l'horloge à pendule.

**1675.** Huygens et Hooke inventent le balancier spiral.

**Loi de Hooke.** Les objets élastiques ont une force de rappel proportionnelle à la déformation.

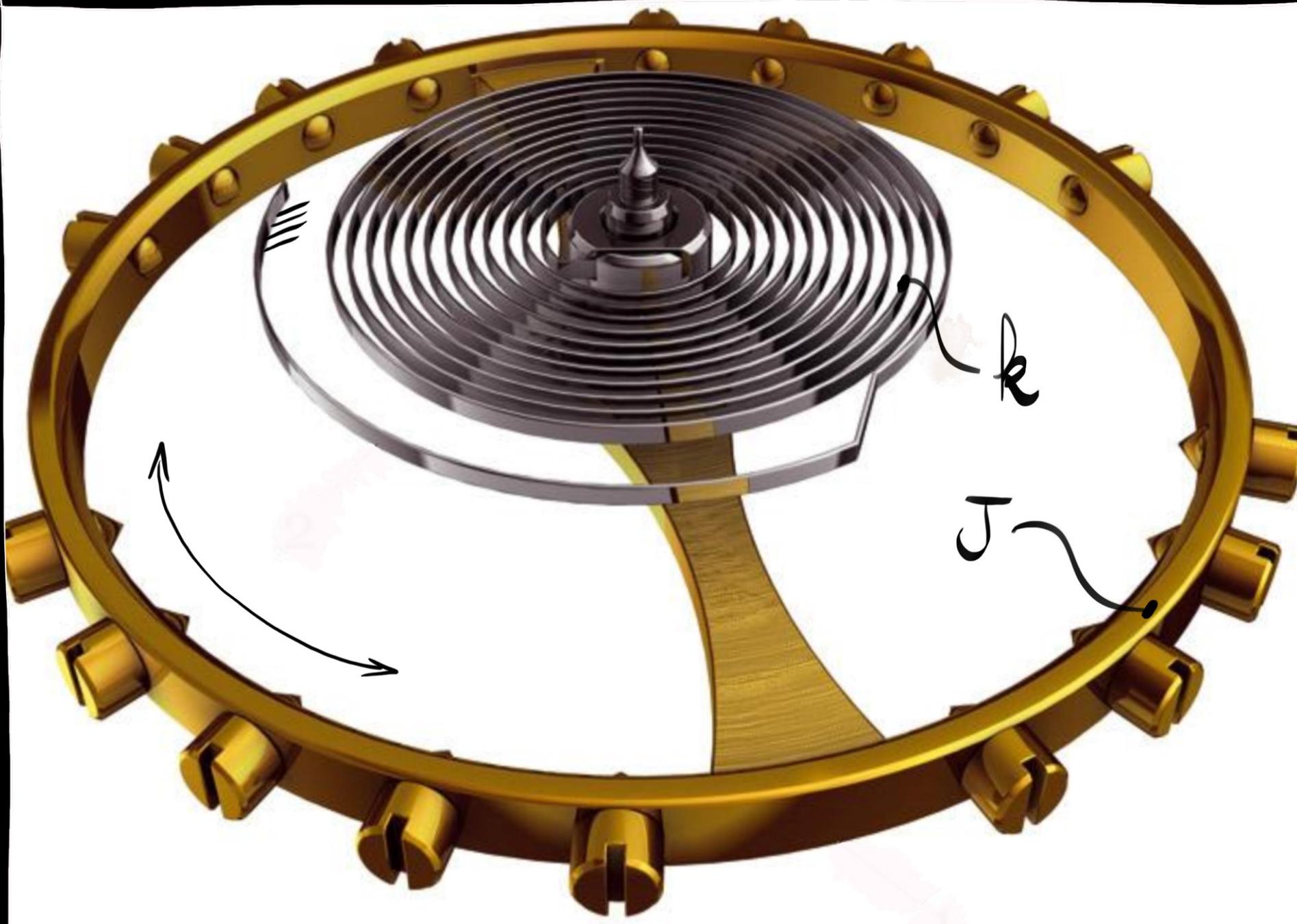
⇒ les oscillations d'objets élastiques sont isochrones.



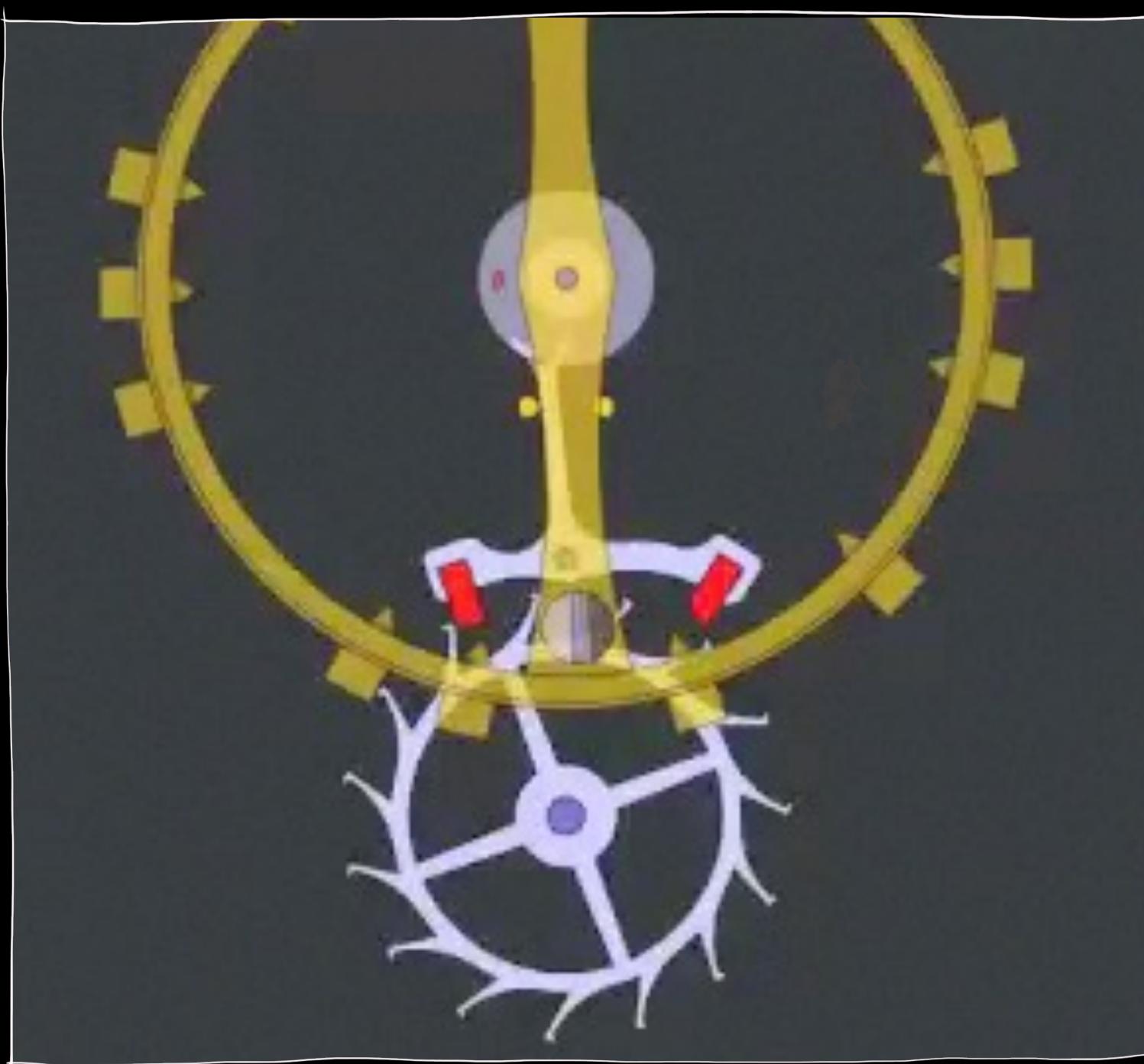
Conquête du temps : horloge plus précise que le Soleil.

Erreur du Soleil = de -17s à + 30s/jour.

**19ème siècle.** Le jour solaire vrai est abandonné en faveur du *temps solaire moyen* (Paris 1826). Ce *temps civil* artificiel est possible à cause des horloges précises.







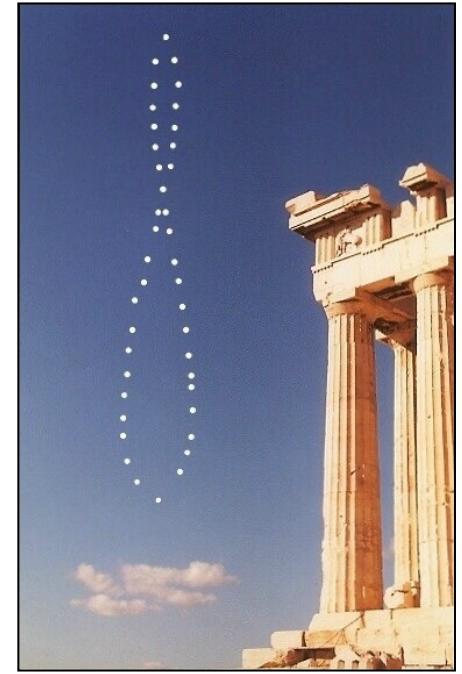
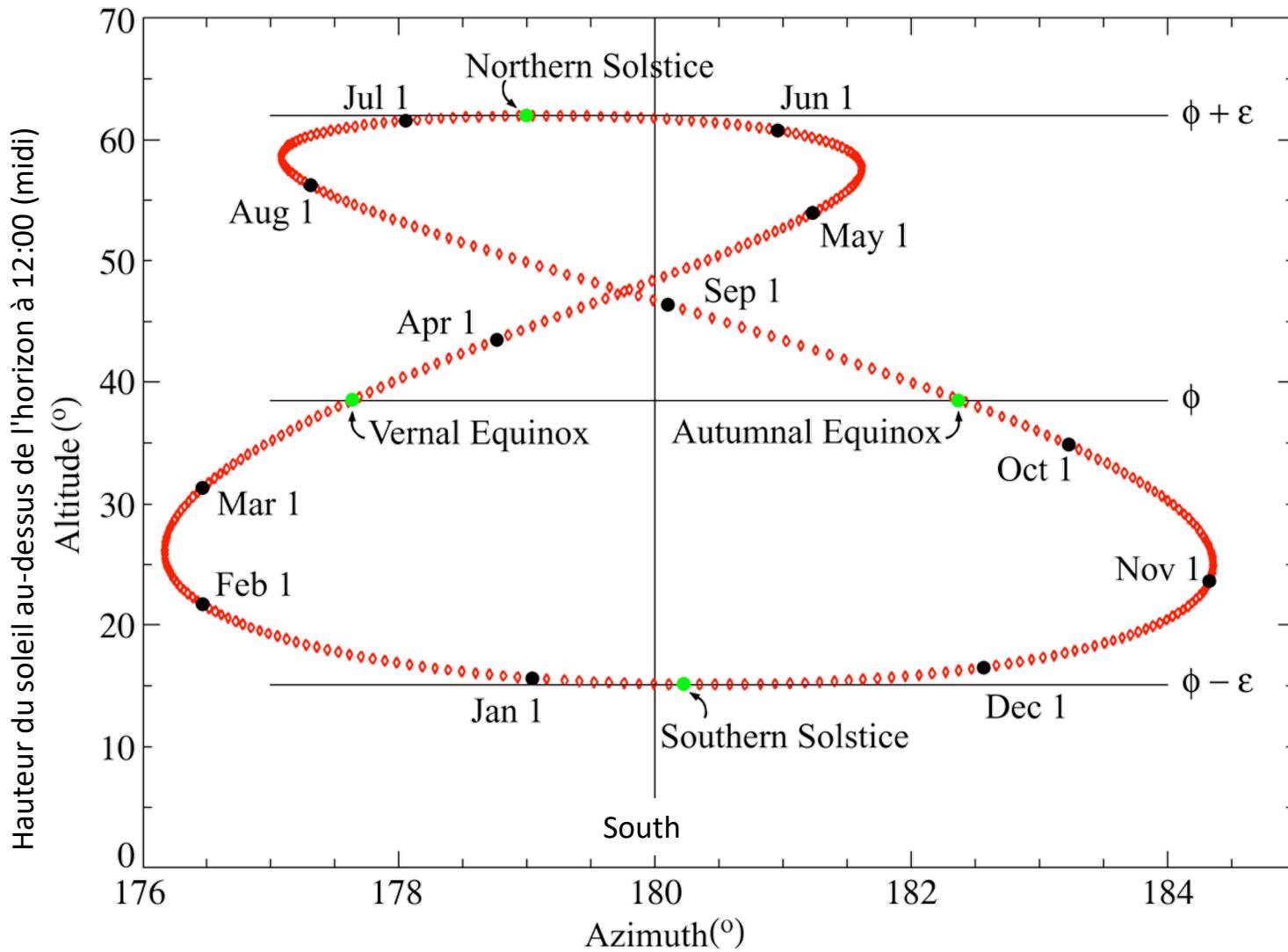
XVIII<sup>e</sup>  
-2016



XVIII<sup>e</sup>  
2016

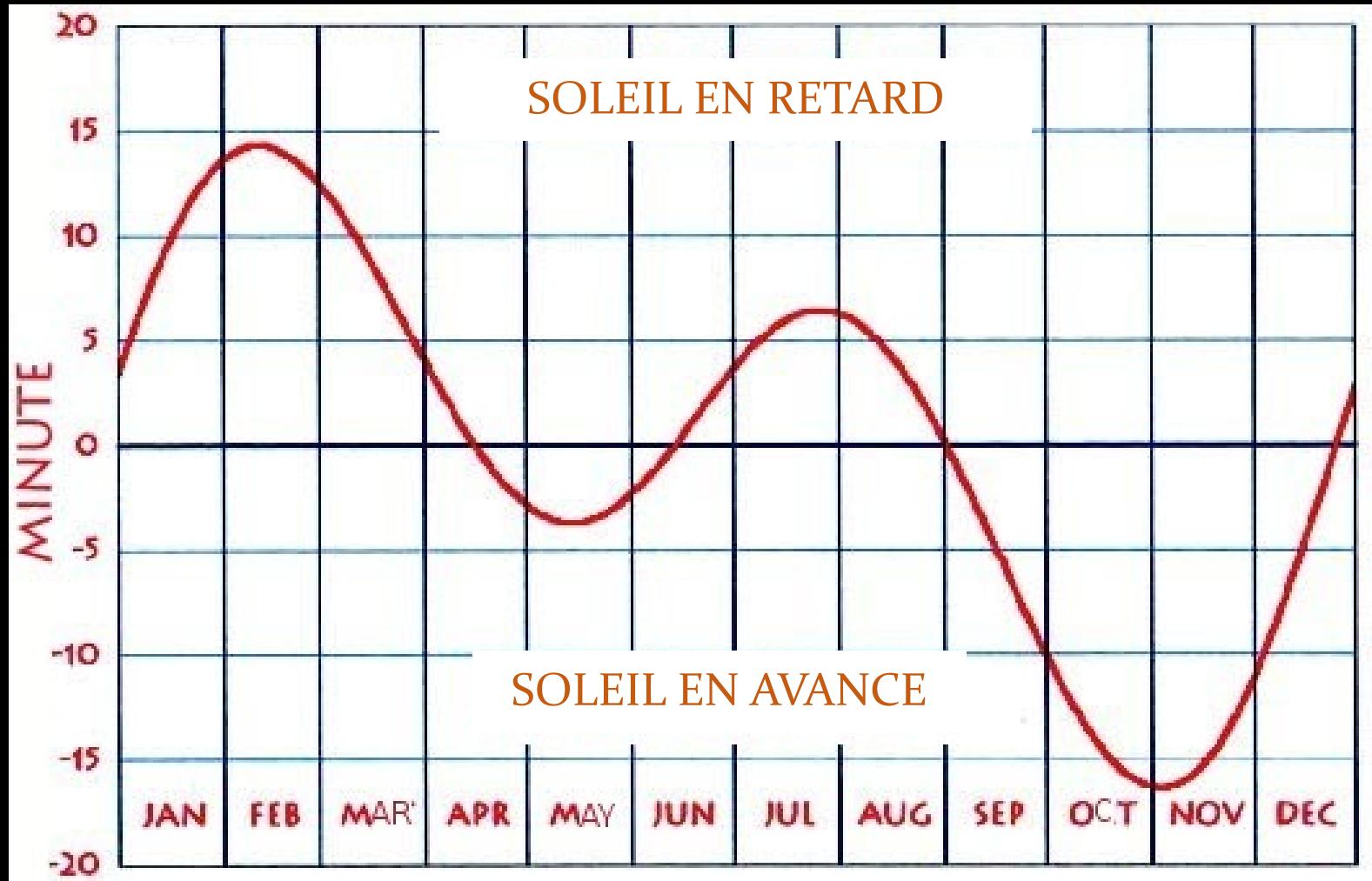
## Exemple d'analemme

Observatoire royal de Greenwich (latitude  $51.5^\circ$  nord, longitude  $0^\circ$ ), année 2006



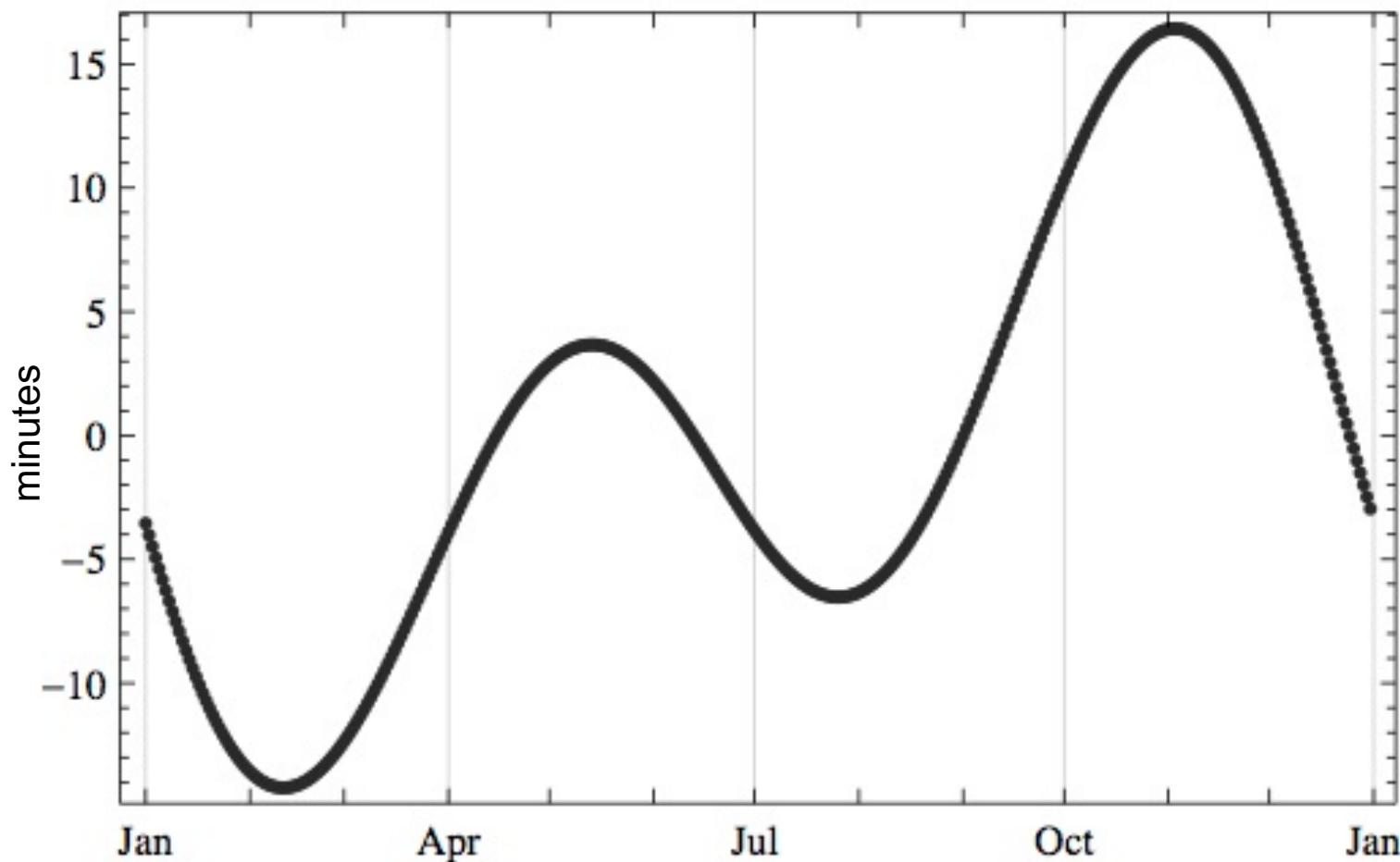
Le premier jour de chaque mois est affiché en noir. Les équinoxes ont lieu à l'altitude  $\phi = 90^\circ - Latitude = 90^\circ - 51.5^\circ = 38.5^\circ$ . Les solstices ont lieu aux altitudes  $\phi + \varepsilon$  et  $\phi - \varepsilon$  où  $\varepsilon = 23.4^\circ$  est l'inclinaison de l'axe de la terre par rapport à son plan orbital.

## *« Equation » du temps*



*Ponctualité du soleil (temps astronomique) au cours de l'année  
par rapport à l'heure civile (temps artificiel)*

## « Equation du temps » : erreur chronométrique du soleil



L'équation du temps est l'*erreur chronométrique cumulée* du soleil = heure Soleil réelle – heure Soleil moyenne

L'heure Soleil moyenne = heure civile corrigée + décalage horaire (été vs hivers)

L'erreur est comprise entre **+16 minutes** et **-14 minutes**

L'erreur *diurne* (durée d'un jour solaire), varie de **-30 secondes à +17 secondes**

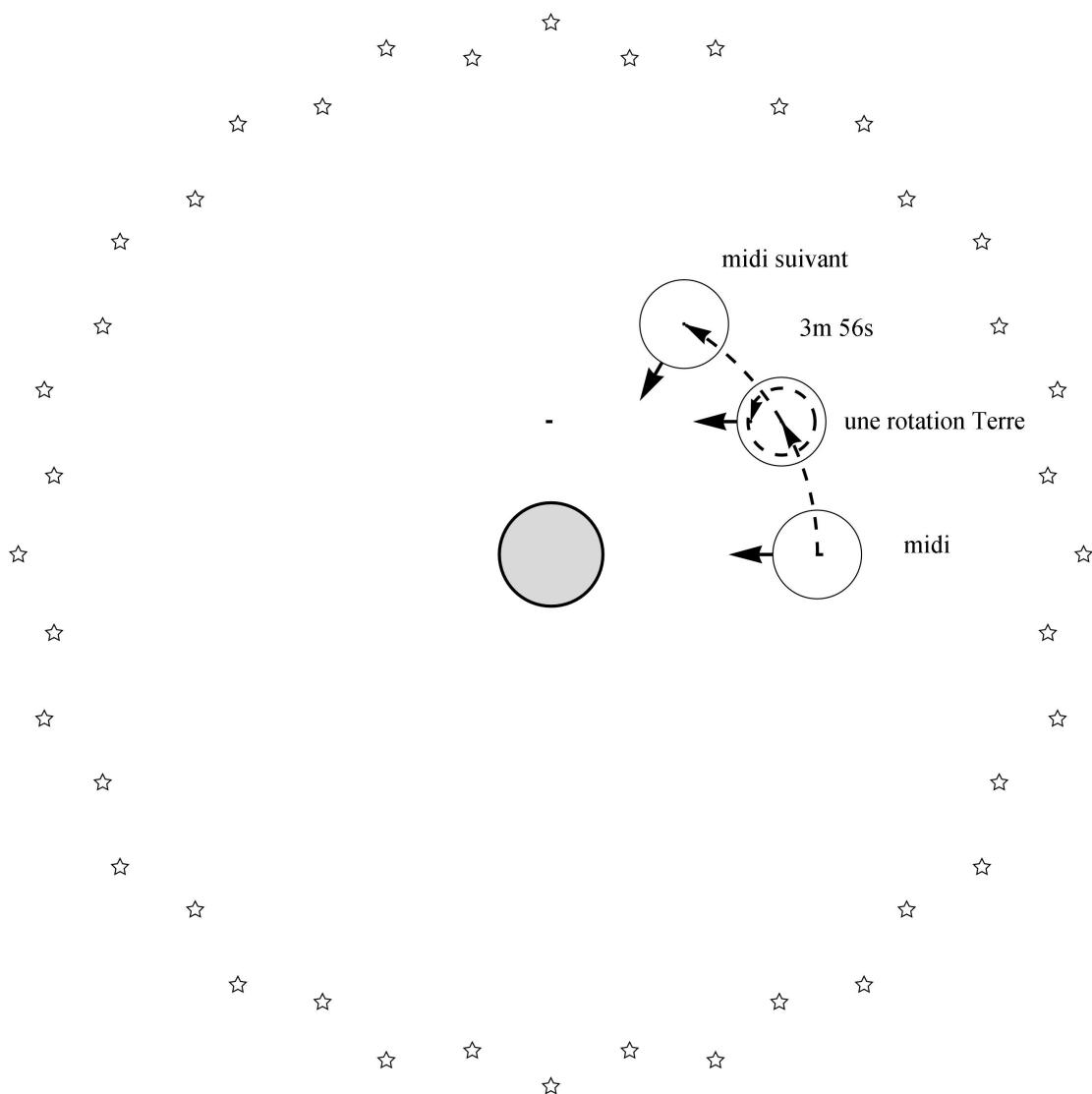
Le jour solaire le plus long dure 24heures + 30 secondes

Les jours solaires le plus court dure 24 heures – 17 secondes

## **Signification astronomique du jour (24 heures)**

?

# Signification astronomique du jour (24 heures)



*Un jour est l'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs du Soleil au méridien d'un lieu.*

- La Terre tourne sur elle-même **366.25** fois en un an de **365.25** jours.

Une rotation Terre =

$$\frac{365.25}{366.25} \times 24h = 23h\ 56m\ 4s.$$

- Les étoiles avancent de 3m 56s par jour (ciel d'été, ciel d'hiver)
- Le jour solaire le plus long (autour du 22 décembre) dure : **24h + 30s**
- Les jours solaires le plus court (autour du 16 septembre) dure **24h – 17s**.

# Chronologie

**250 av.-J.C.** Aristarque propose que la Terre tourne autour du Soleil. Archimède est d'accord mais Ptolémée le contredit avec des arguments corrects pour l'époque.

**1543.** Le livre de Copernic propose le modèle héliocentrique.

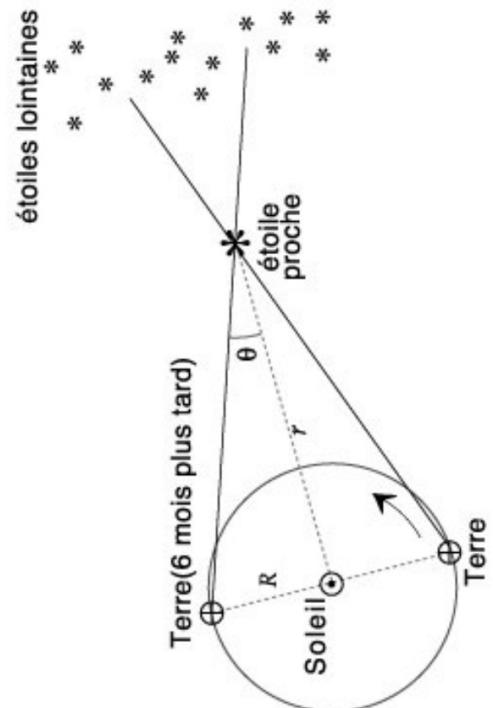
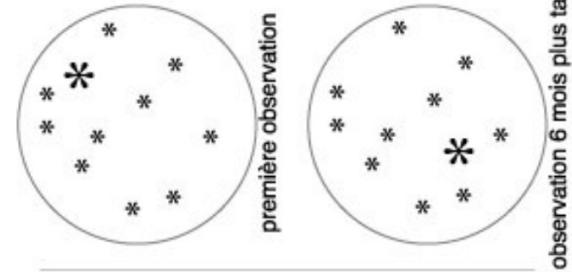
**1619.** Kepler donne les lois décrivant le mouvement des planètes autour du Soleil.

**1633.** Galilée est condamné par l'inquisition et doit contredire la théorie héliocentrique.

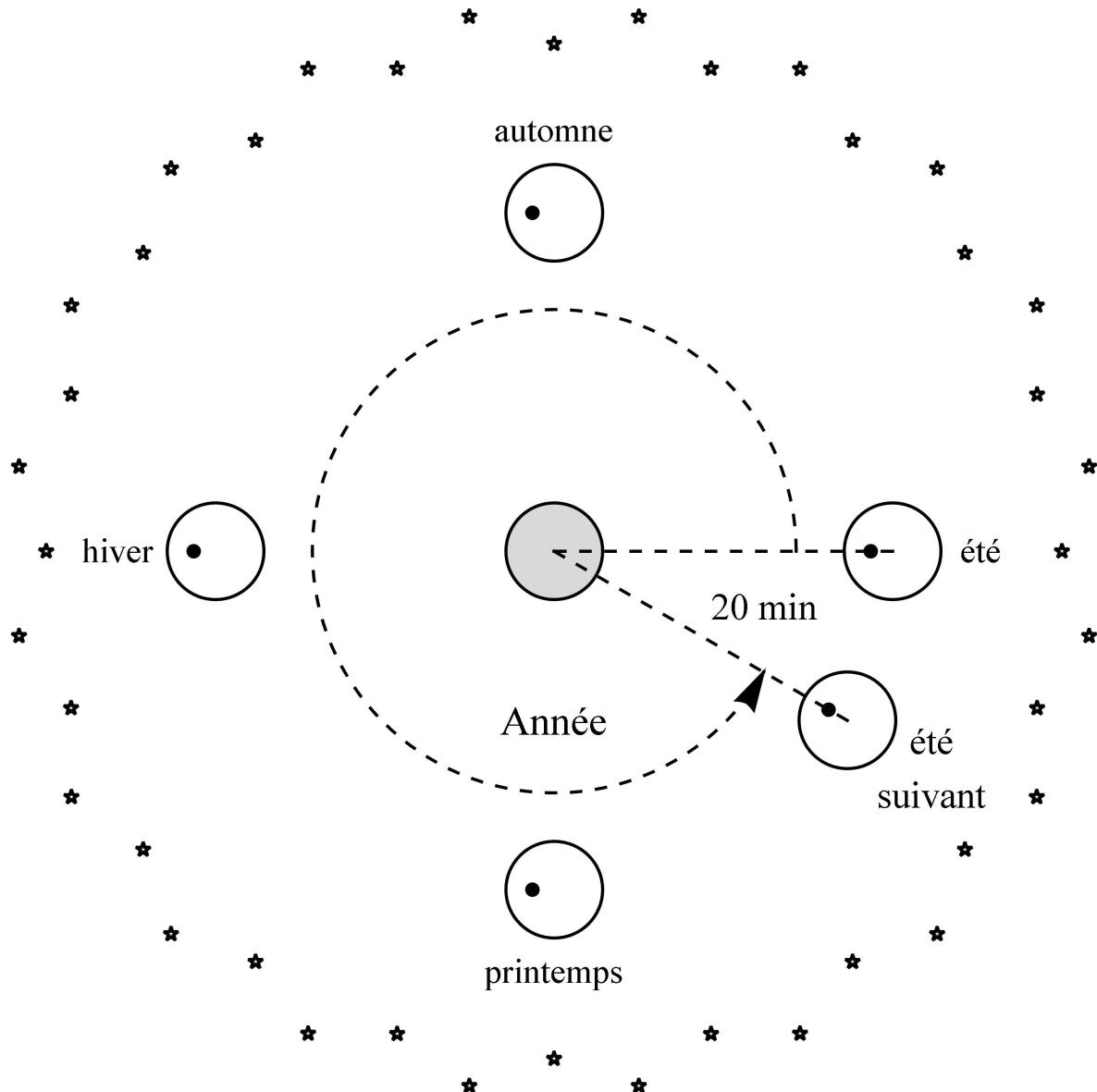
**1687.** Isaac Newton découvre les lois du mouvement et de la gravité et prouve les lois de Kepler.

**1837.** Bessel observe le parallaxe des étoiles et donne enfin la preuve expérimentale que la Terre tourne autour du Soleil.

Parallaxe d'une étoile



## Signification astronomique de l'année



*Une année est l'intervalle de temps qui sépare les retours des saisons.*

- La Terre tourne autour du soleil en 1 an et 20 minutes
- Précession des équinoxes

# Le garde temps

Le mouvement des astres définissent :

- Année (retour des saisons)
- Mois (phase de lune pour les calendriers chinois, juif et musulman)
- Jour (une rotation du «soleil autour de la terre»)
- Moment de la journée (position du soleil, ou des autres étoiles, dans le ciel)

Les garde de temps sont nécessaires pour connaître l'heure quand les astres ne sont pas visibles.



Cadran solaire portatif

## Isochronisme

- Découvert par Galilée et établi par C. Huygens au XVII<sup>e</sup> siècle
- La mesure du temps est indépendante de la force motrice: principe de base de l'horlogerie de précision
- Erreur chronométrique atteinte avec le pendule: environ 15 secondes/jour

Ceci « Plus précis que le soleil », puisque la durée d'un jour solaire varie de -30 à +17 secondes au cours de l'année.



Galilée regardant le lustre de l'Eglise de Pise Sabatelli Luigi, début XIXe

# Isochronisme

- Pendule et gravité

$$M = J\ddot{\theta}$$

$$\rightarrow -mgL \sin \theta = mL^2\ddot{\theta}$$

Pour de petites oscillations:

$$\sin \theta \cong \theta \rightarrow M \cong -mgL\theta$$

$$\rightarrow \ddot{\theta} + \omega_0^2\theta = 0, \quad \omega_0 = \sqrt{g/L}$$

$$\rightarrow \theta(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

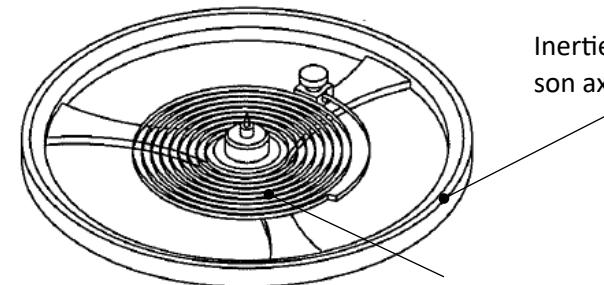
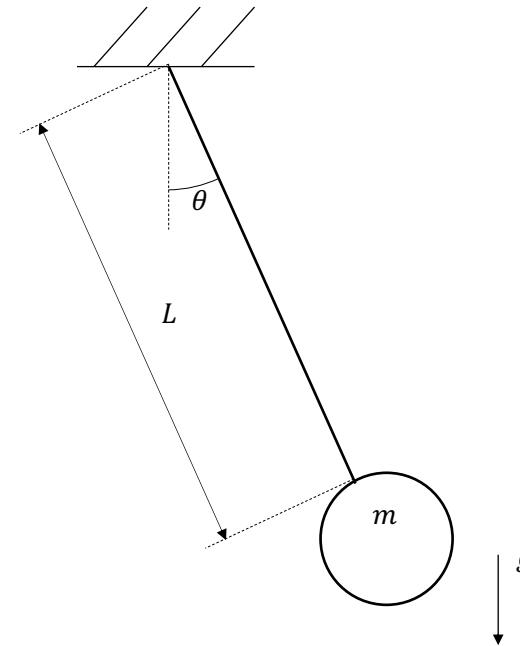
- Balancier et ressort spiral

$$M = J\ddot{\theta}$$

$$\rightarrow -k\theta = J\ddot{\theta}$$

$$\rightarrow \ddot{\theta} + \omega_0^2\theta = 0, \quad \omega_0 = \sqrt{k/J}$$

$$\rightarrow \theta(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$$



Inertie du balancier autour de son axe de rotation:  $J$

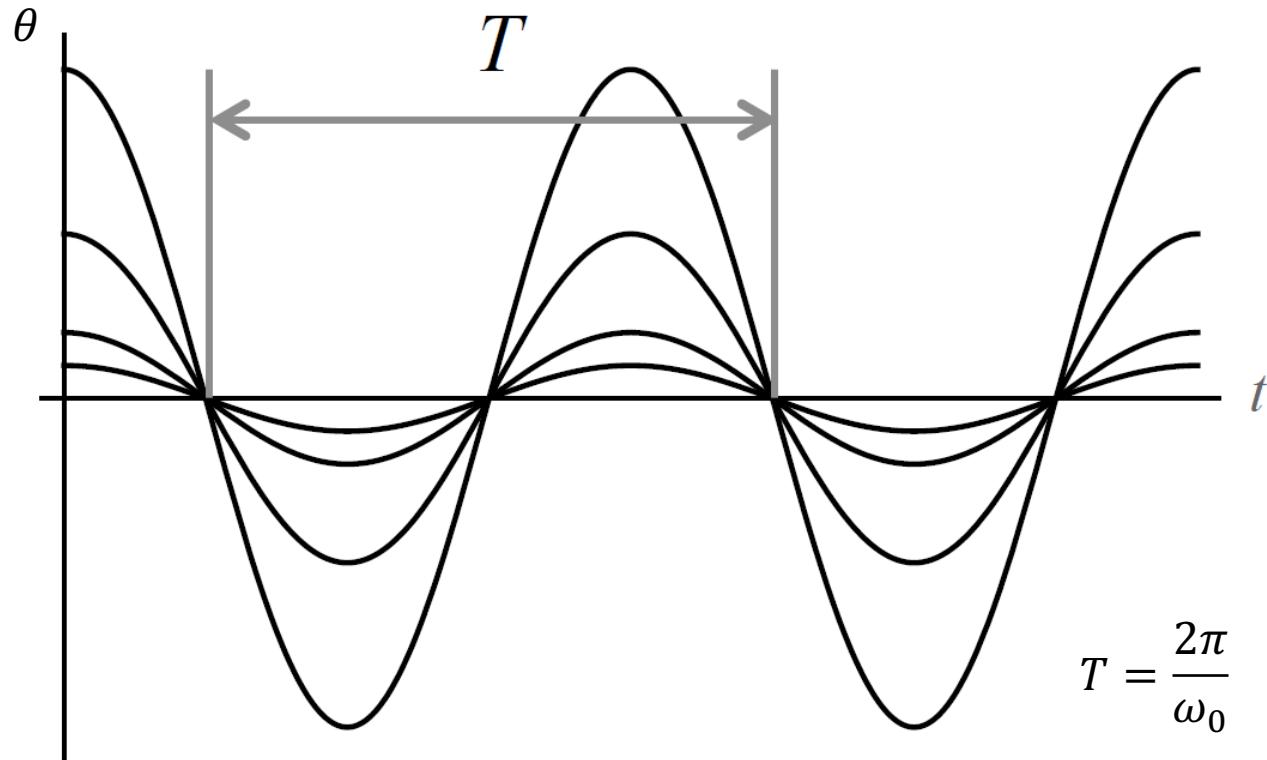
Constante de rappel du ressort:  $k$

(1): Deuxième principe de Newton pour un corps d'inertie  $J$  en rotation, soumis à un couple  $M$

# Isochronisme

Solution particulière (petites oscillations pour un pendule):

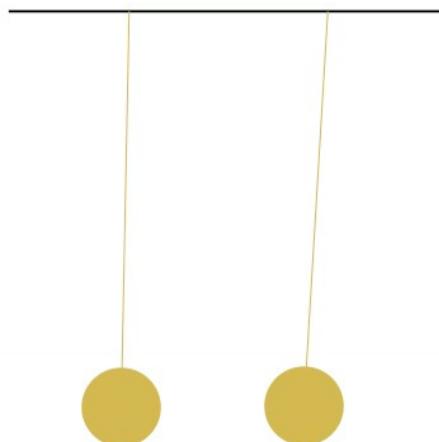
$$\theta(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$$



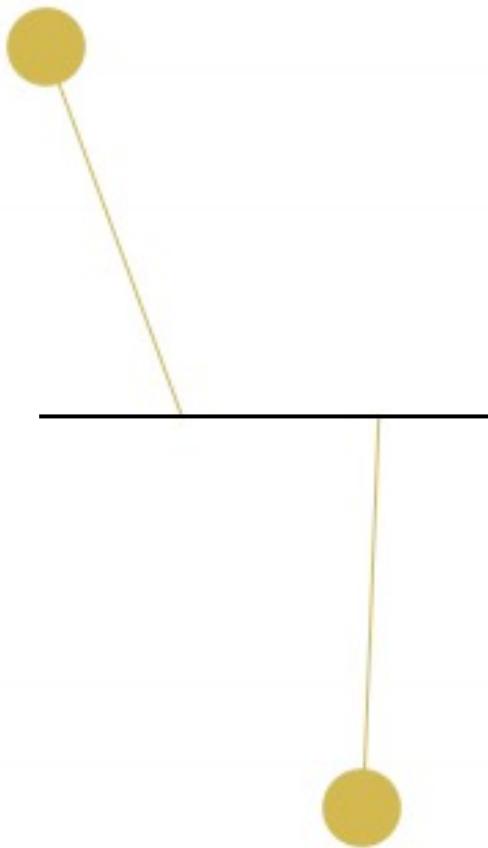
La période  $T$  est indépendante de l'amplitude  $A$ .

## Isochronisme

- Pendule et gravité



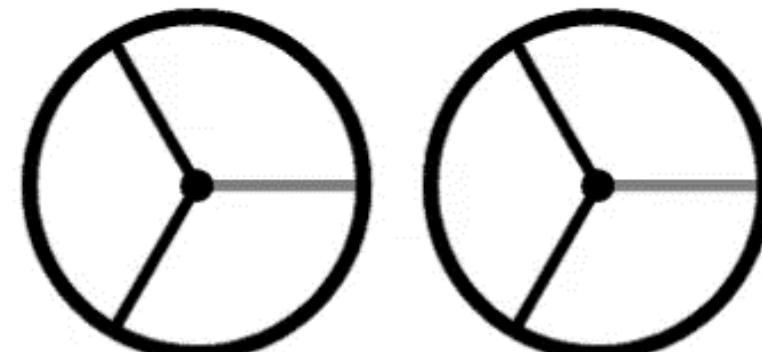
Petites oscillations: petit défaut d'isochronisme



Grandes oscillations: non-isochrone

- Balancier et ressort spiral

Théoriquement isochrone



# Garde temps - isochronisme

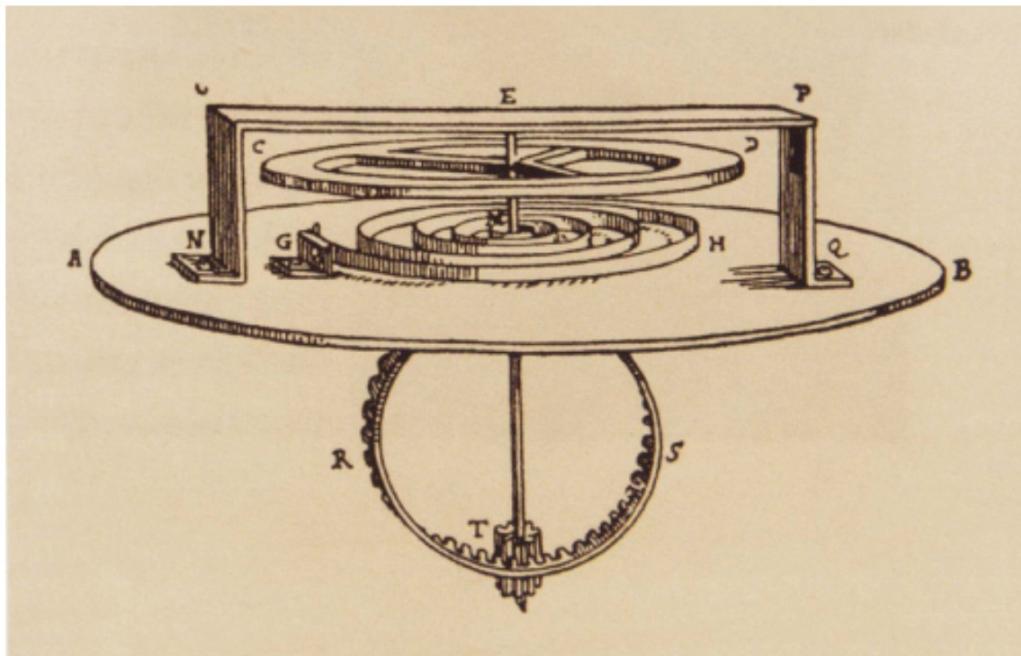
**Isochronisme.** Principe de base de l'horlogerie.

Mesure du temps est libérée de la force motrice.

Précision  $\Rightarrow$  15 secondes/jour.

**Nécessité d'une théorie du temps.** L'équation de l'oscillateur et les mathématiques donnant sa solution.

L'horlogerie devient une science.



Christiaan Huygens (1629–1695)

Mathématicien et horloger. Physicien, astronome, etc.  
A découvert les anneaux de Saturne.

## Amortissement

Pendule avec couple de frottement visqueux:

$$M_f = -c\dot{\theta}$$

avec  $c$  coefficient de frottement visqueux

$$M + M_f = J\ddot{\theta}$$

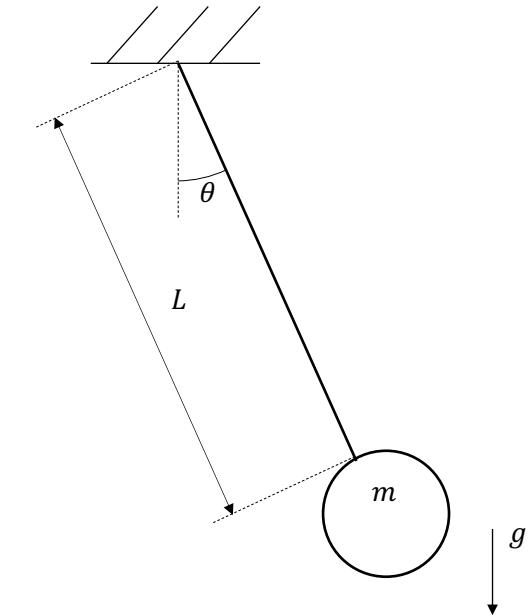
$$\rightarrow -mgL \sin \theta - c\dot{\theta} = mL^2\ddot{\theta}$$

Pour petites oscillations:

$$\sin(\theta) \cong \theta \rightarrow M \cong -mgL\theta$$

$$\rightarrow \ddot{\theta} + \omega_0^2\theta + \frac{\omega_0}{Q}\dot{\theta} = 0, \quad \omega_0 = \sqrt{g/L}, \quad Q = \frac{\omega_0 J}{c}$$

$$\rightarrow \theta(t) = A_0 e^{\frac{-\omega_0 t}{2Q}} \cos(\omega t), \quad \omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} < \omega_0$$



## Garde temps – aspects énergétiques

- Amplitude de l'oscillateur à la  $n^{\text{ième}}$  oscillation:

$$A[n] = A_0 e^{\frac{-\omega_0 n T}{2Q}} = A_0 e^{\frac{-\pi n}{Q}}, \quad \omega_0 = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

- Energie de l'oscillateur à la  $n^{\text{ième}}$  oscillation:

$$E[n] = \frac{1}{2} k A^2[n] = \frac{1}{2} J \omega_0^2 A^2[n], \quad \omega_0 = \sqrt{k/J}$$

- Energie perdue en une oscillation pour  $Q \gg 1$

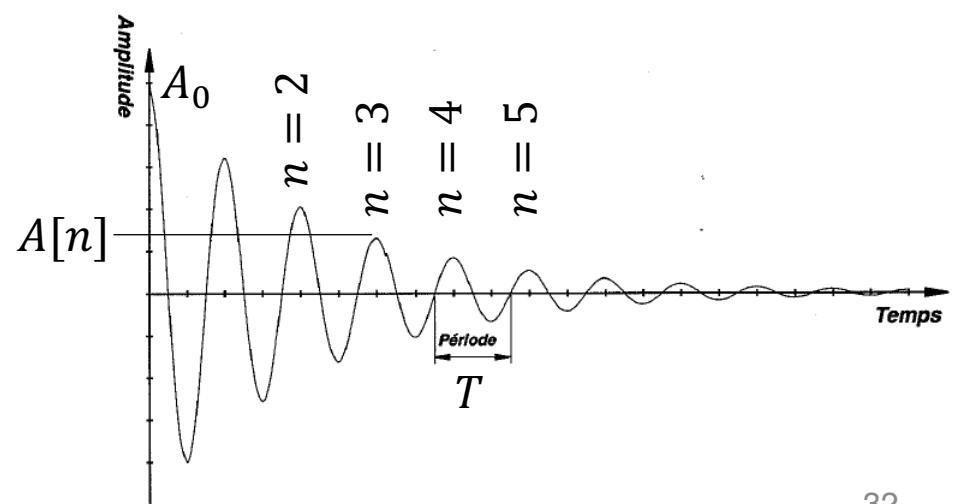
$$E[n+1] - E[n] = \frac{1}{2} J \omega_0^2 (A^2[n+1] - A^2[n]) \cong \frac{-J \pi \omega_0^2 A^2}{Q} [n]$$

- Energie de restitution (énergie à apporter à l'oscillateur à chaque oscillation pour maintenir une amplitude  $A$ )

$$E_r = \frac{J \pi \omega_0^2 A^2}{Q} = \frac{2\pi E}{Q}$$

- Puissance dissipé par l'oscillateur à l'amplitude  $A$  :

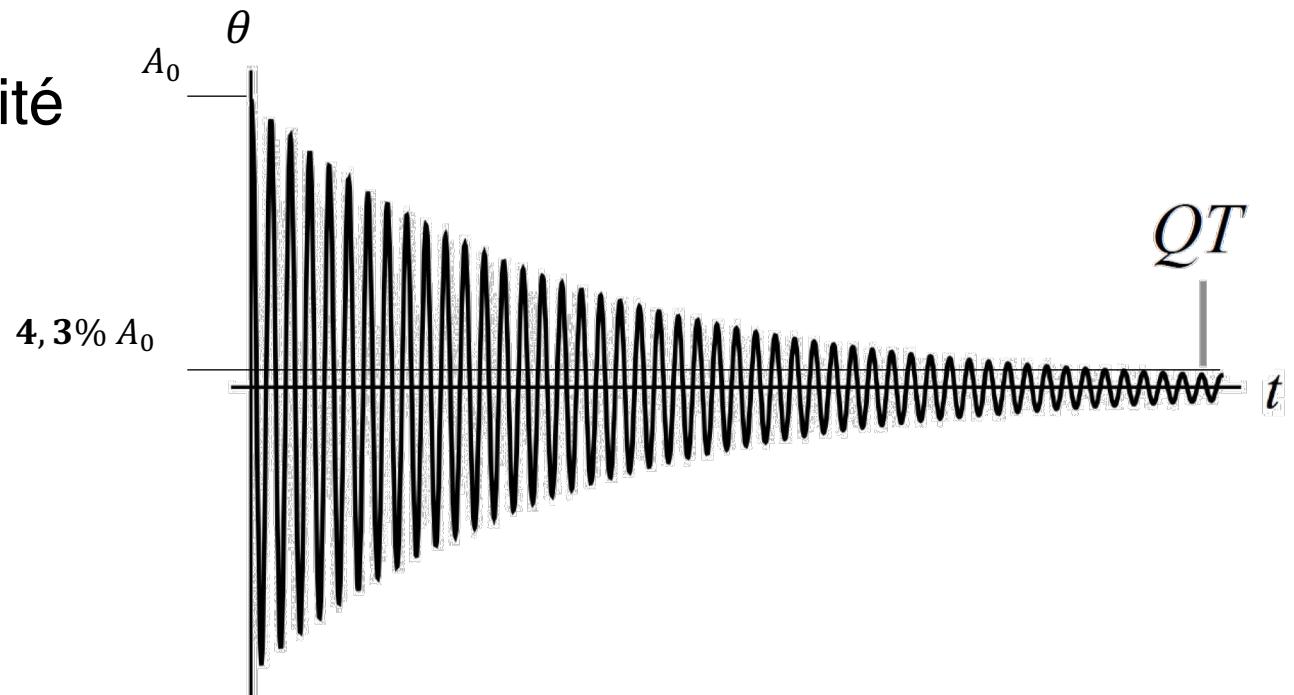
$$P = \frac{J \omega^3 A^2}{2 Q} = \frac{4 \pi^3 f^3 J A^2}{Q}$$



## $Q$ : facteur de qualité

- Définition

$$Q = \frac{2\pi E}{E_r}$$



- Valeurs typiques

*Type d'oscillateur*

Balancier-spiral de montre bracelet

$Q$

100 – 300

Balancier spiral de chronomètre de marine

300 – 700

Diapason Accutron

1000 – 2000

Pendule de précision (pression atmosphérique)

3000 – 15000

Pendule de précision (sous vide)

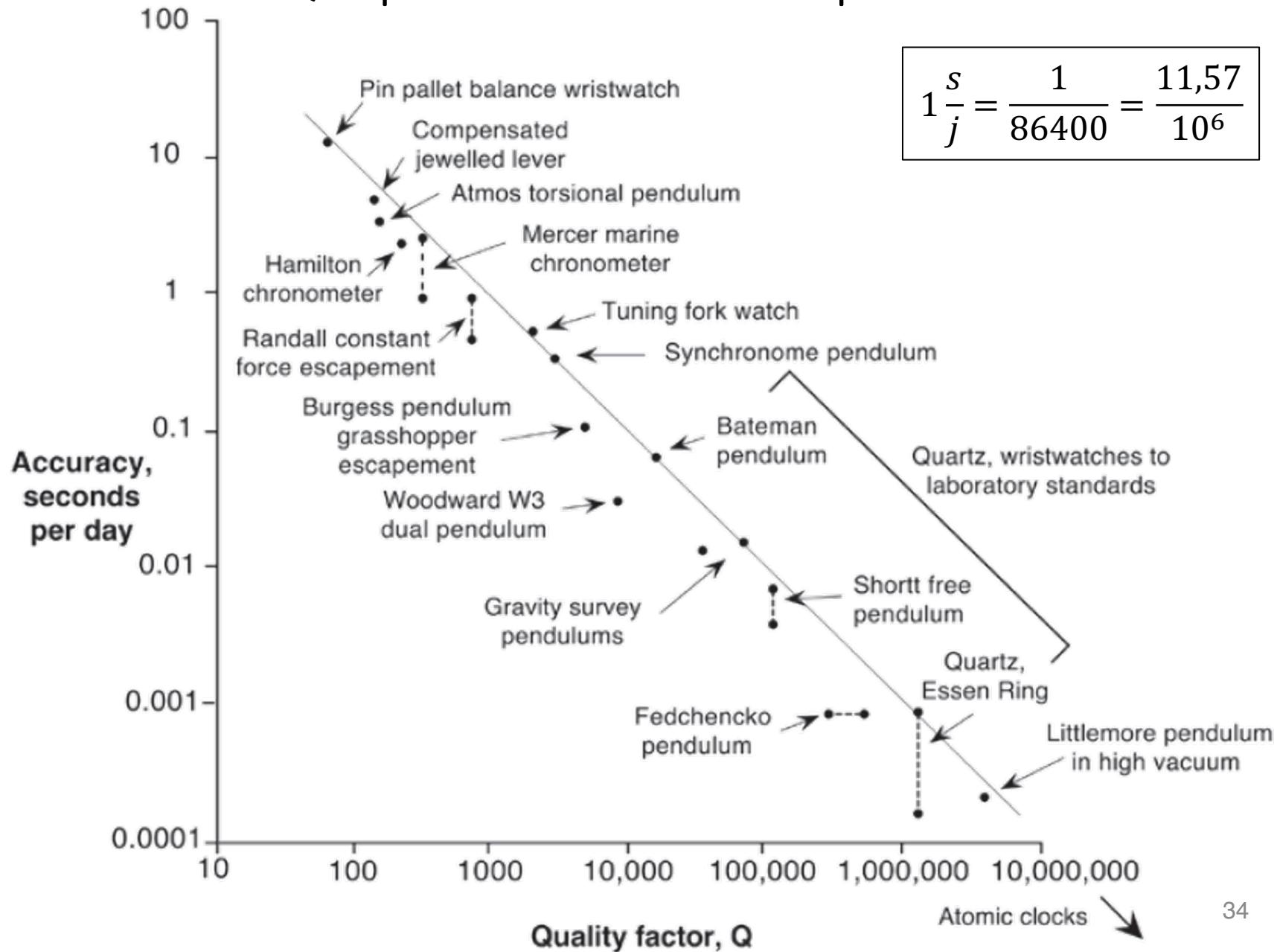
100,000 – 200,000

Diapason quartz de montre bracelet

100,000 – 1,000,000

Horloge atomique

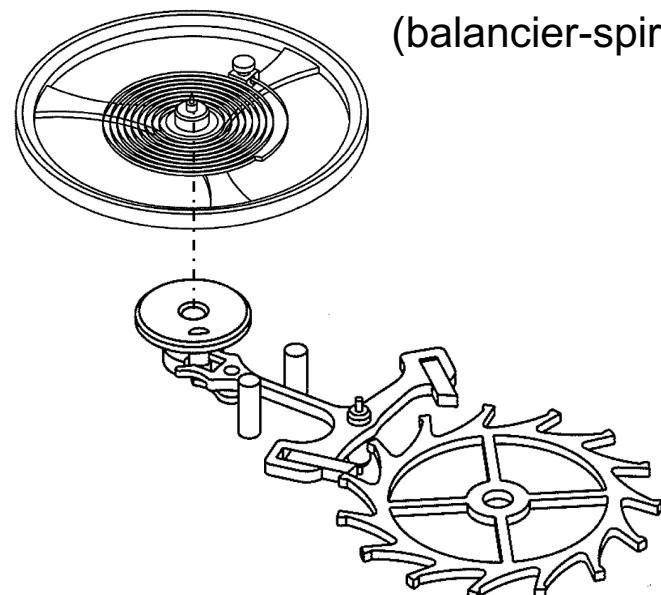
50,000,000 – 200,000,000++

*Q et précision chronométrique sont corrélés*

## Valeurs typiques pour un oscillateur de montre bracelet

- $A = \pm 220^\circ$
- $Q = 240$
- $J = 1 \cdot 10^{-9} \text{ kg m}^2$
- $f = \frac{\omega}{2\pi} = 4 \text{ Hz}$
- $E_r = \frac{2\pi E}{Q} = \frac{\pi J \omega^2 A^2}{Q} \cong 125 \text{ nJ}$

Oscillateur  
(balancier-spiral)

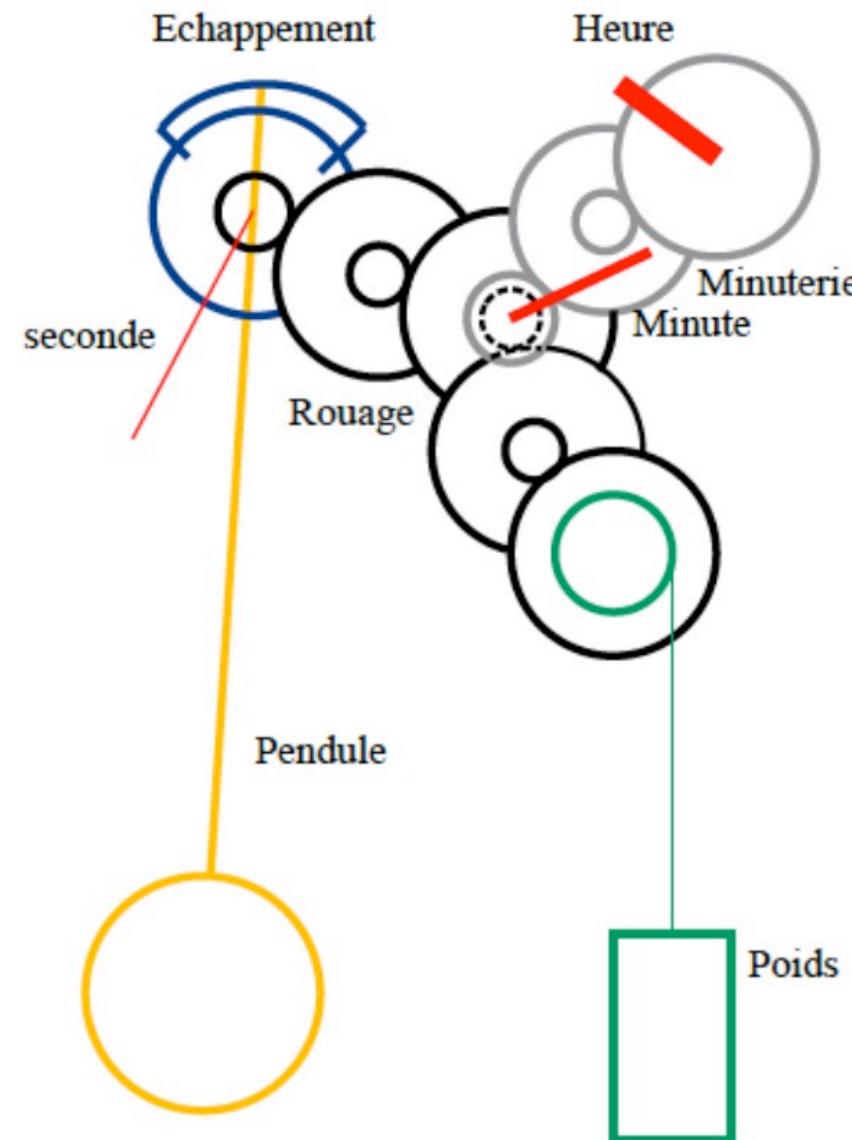


Echappement

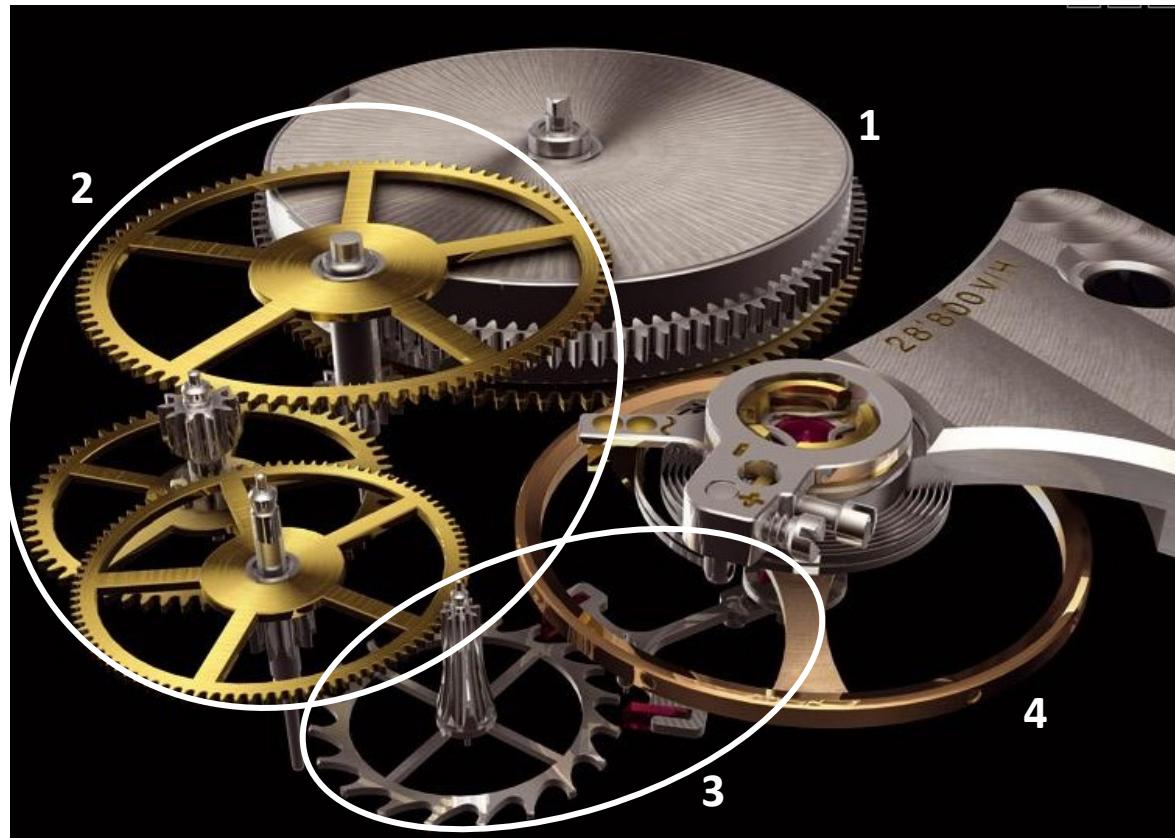
## Puissance dissipée par l'oscillateur

- $P = E_r f = \frac{J \omega^3 A^2}{2 Q} = \frac{4 \pi^3 f^3 J A^2}{Q \eta} \cong 500 \text{ nW}$

# Schéma fonctionnel d'une horloge

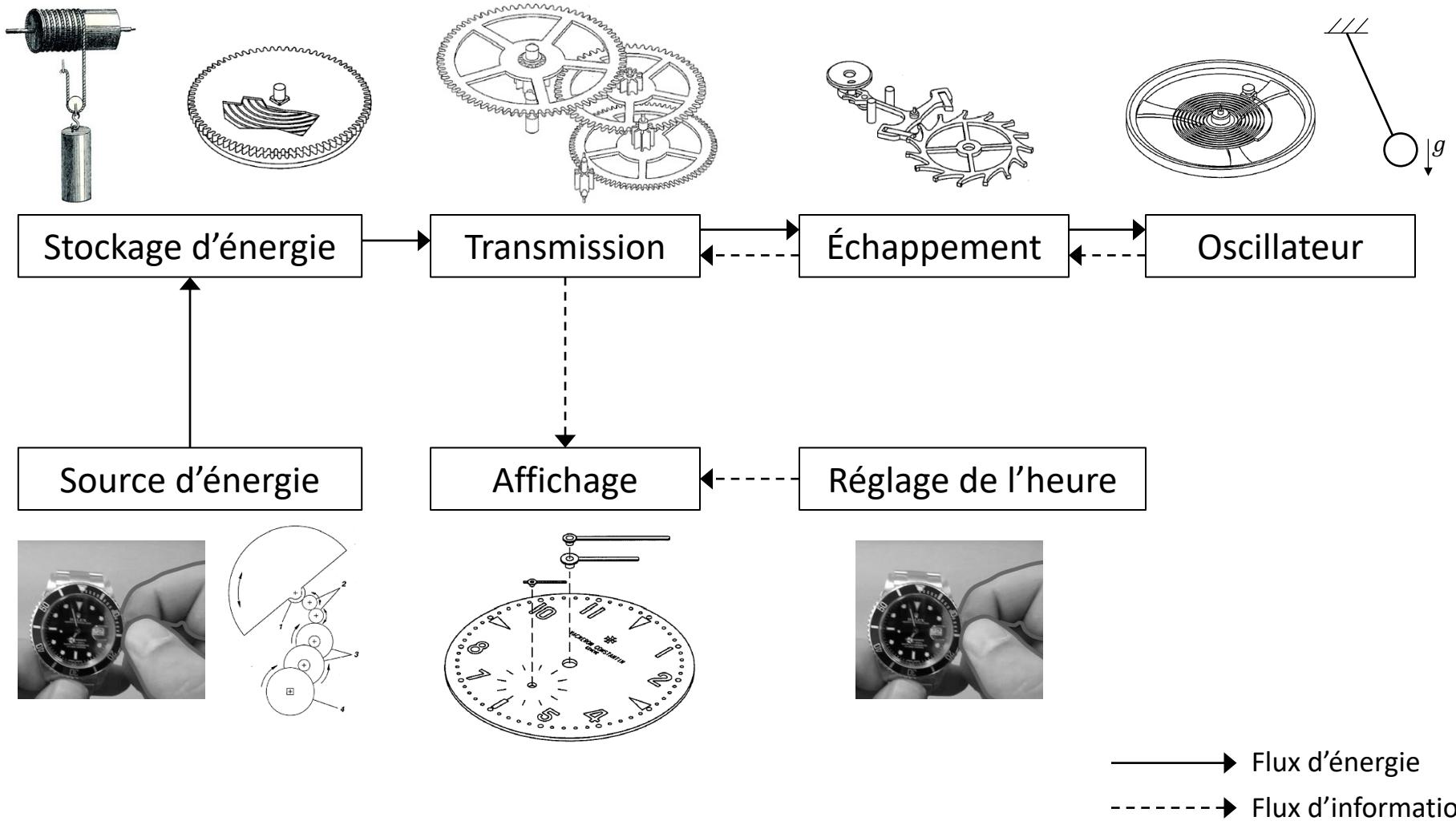


## Mouvement de montre



- (1) Le barillet (stockage de l'énergie)
- (2) Le rouage (transmission, affichage)
- (3) L'échappement, ici à ancre suisse (comptage et entretien)
- (4) Le balancier-spiral (base de temps)

# Schéma fonctionnel et organes d'horloge et de montre



# Pertes et rendements (valeurs typiques)

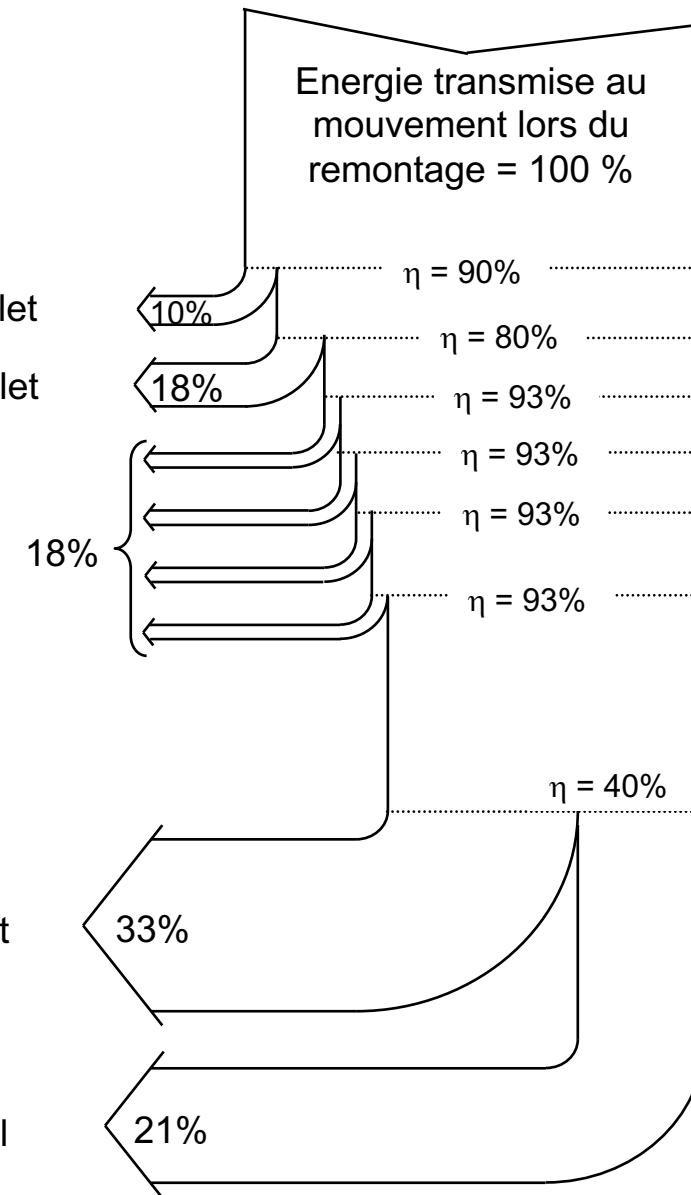
Pertes dans la transmission couronne-barillet

Pertes dans le ressort de barillet

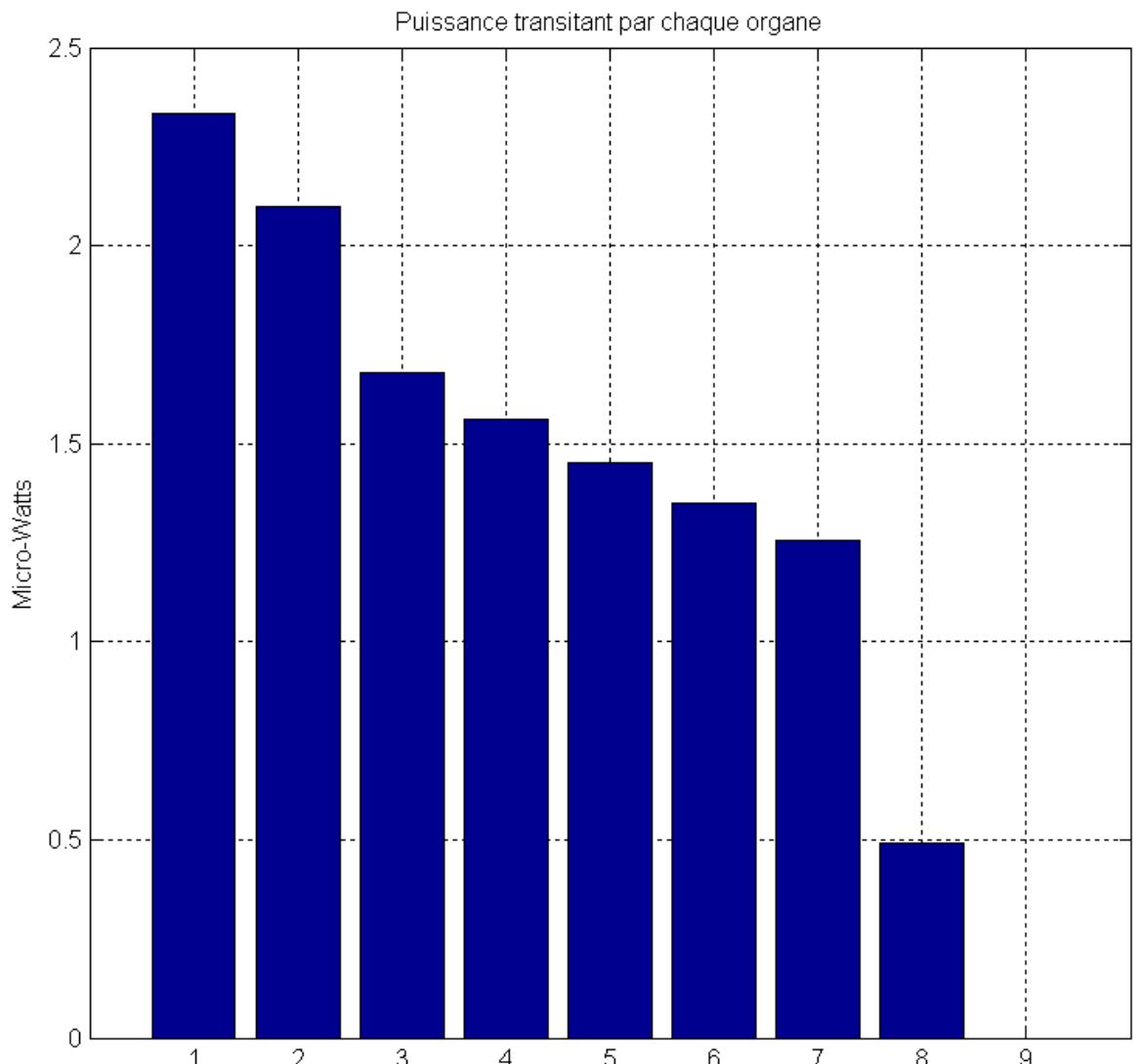
Pertes dans les étages de transmission (engrenages multiplicateurs de vitesse:  $i_{\text{tot}} \cong 4000$  du barillet à la roue d'échappement)

Pertes dans l'échappement

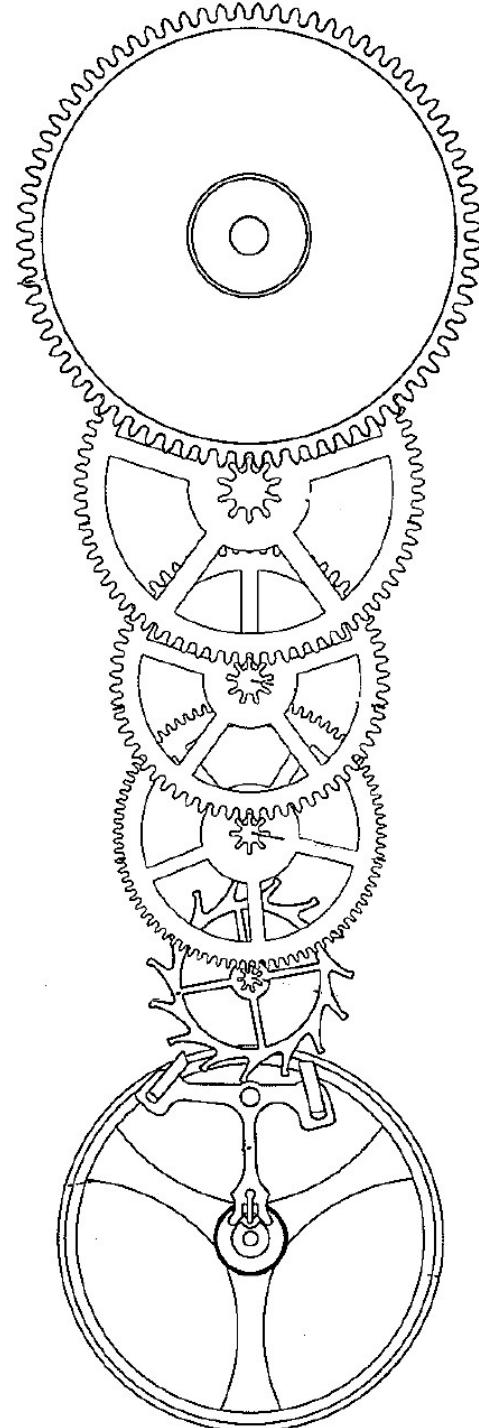
Dissipation du balancier-spiral



# Bilan énergétique (exemple)



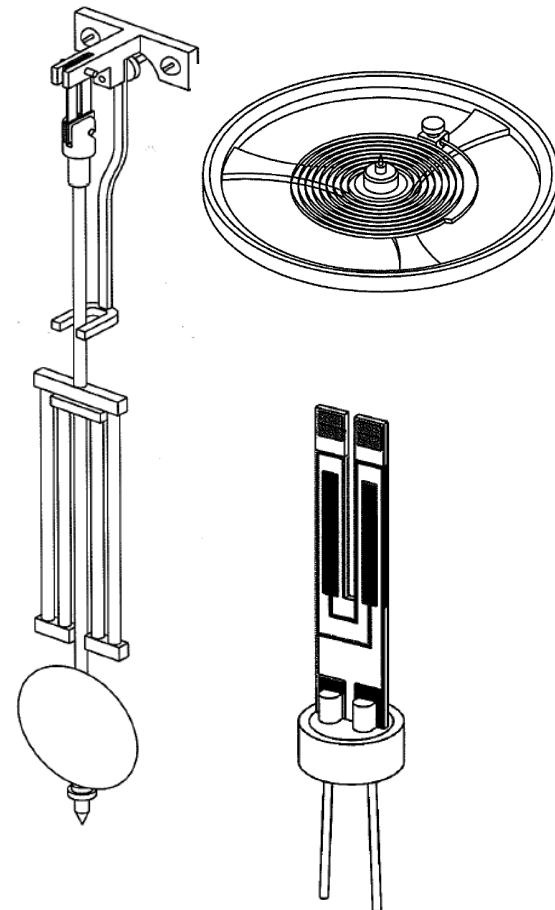
1: Couronne; 2. Bariillet in; 3. Bariillet out; 4-6 Transmission trois étages; 7. Roue echap; 8. Balancier; 9. Sortie



# Base de temps

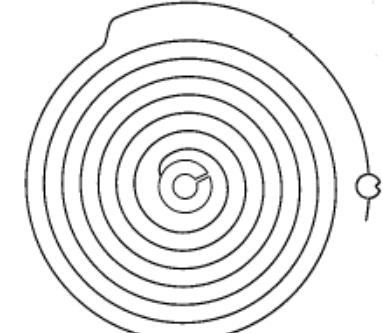
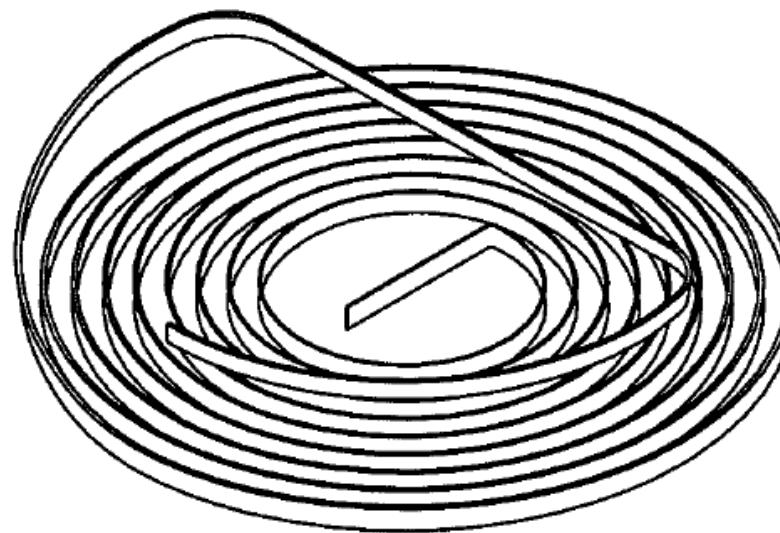
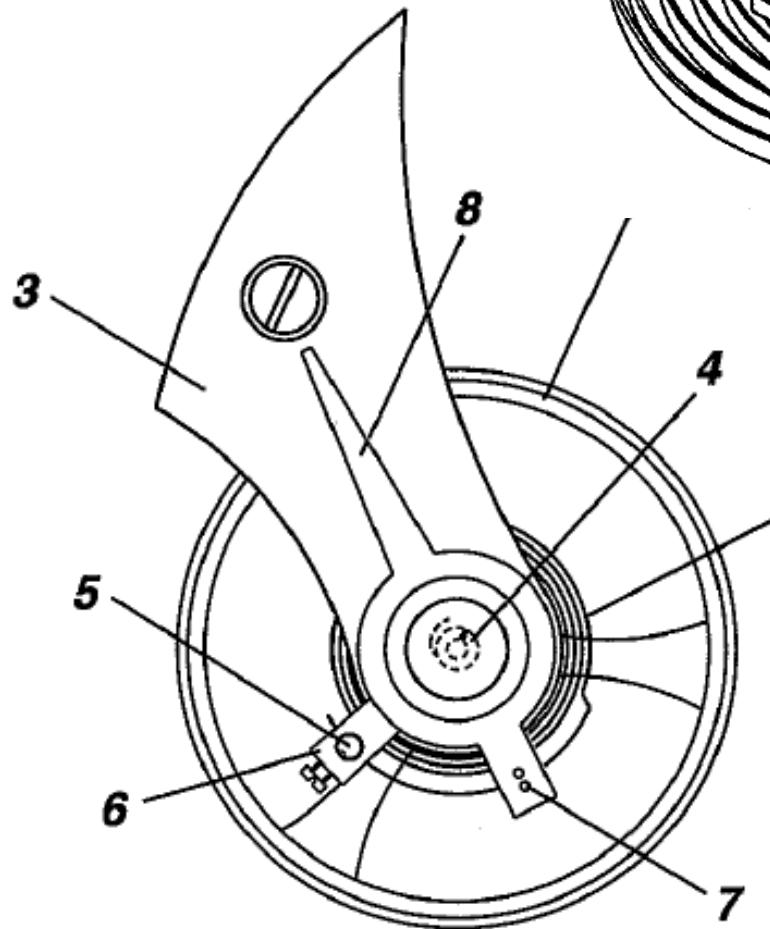
Principales bases de temps:

- **Foliot** (XIII<sup>e</sup> siècle, non-isochrone)
- **Pendule** (Galilée 1583, Huygens 1656, non-isochrone)
- **Balancier-spiral** (Huygens, Hooke, 1675, théoriquement isochrone)
- **IsoSpring** (EPFL Instant-Lab, 2014, théoriquement isochrone)
  
- **Le diapason\*** (électromagnétique 1960, piézoélectrique 1967)
- **L'atome de césium\*** (horloges atomiques milieu du XX<sup>e</sup> siècle)

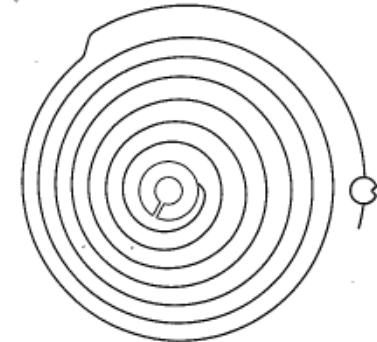


\*Ces oscillateurs nécessitent une gestion électronique et ne se retrouvent donc pas en horlogerie mécanique

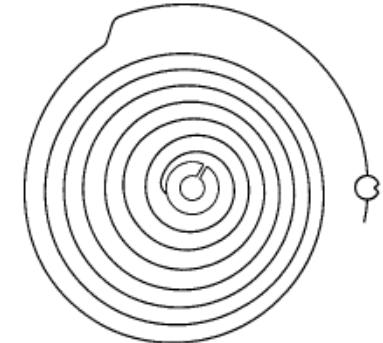
## Ressort spiral



*fig. 7-64 : Au repos.*



*fig. 7-65: Contraction.*



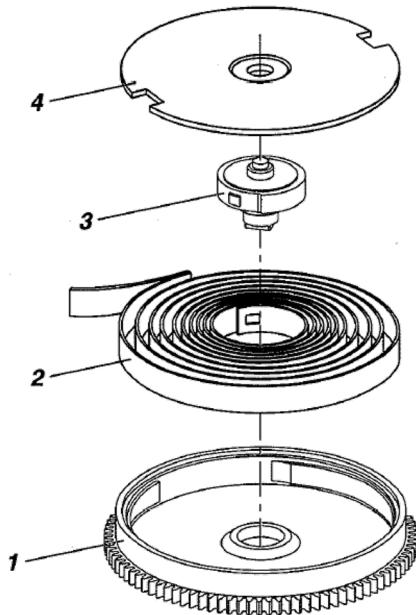
*fig. 7-66 : Expansion.*

# Accumulateur d'énergie

- Moyens de stockage
  - Poids suspendu
  - Barillet à ressort
  - Pile, batterie ou condensateur pour les montres électroniques
- Dissipation énergétique
  - Frottements dans les engrenages et paliers
  - Pertes dans l'échappement
  - Entretien des oscillations
- Remontage manuel vs automatique

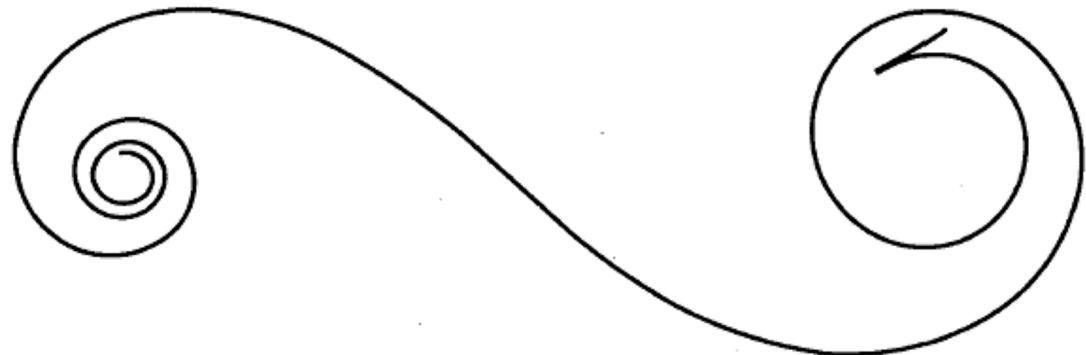
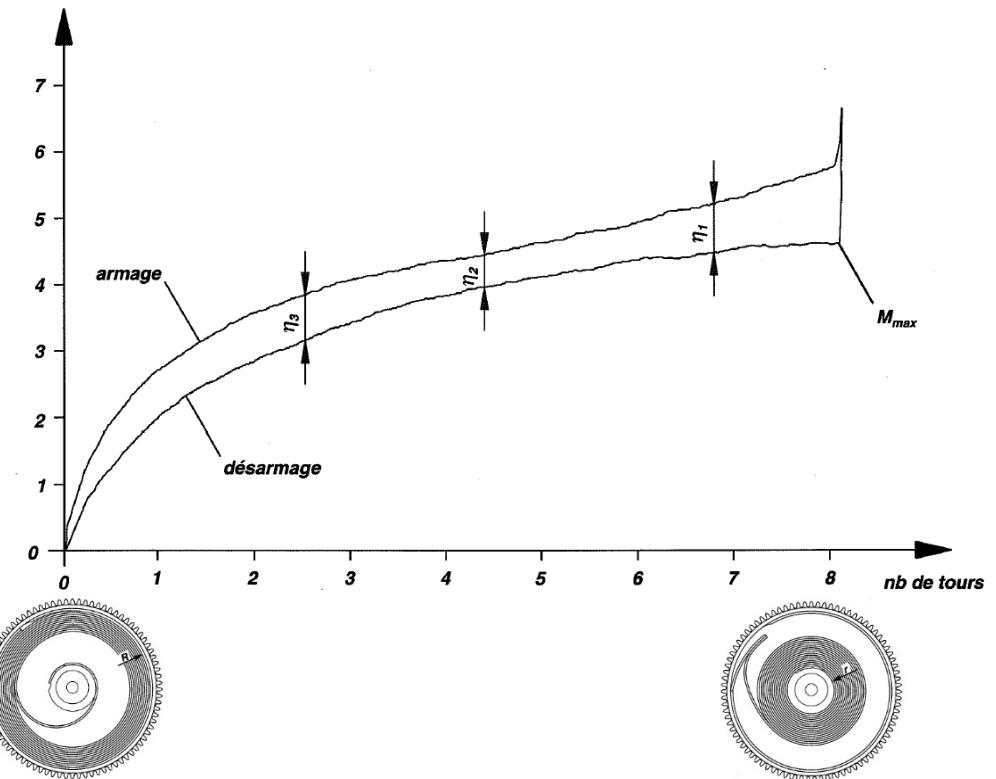
# Organes clés

## Accumulateur: Barillet



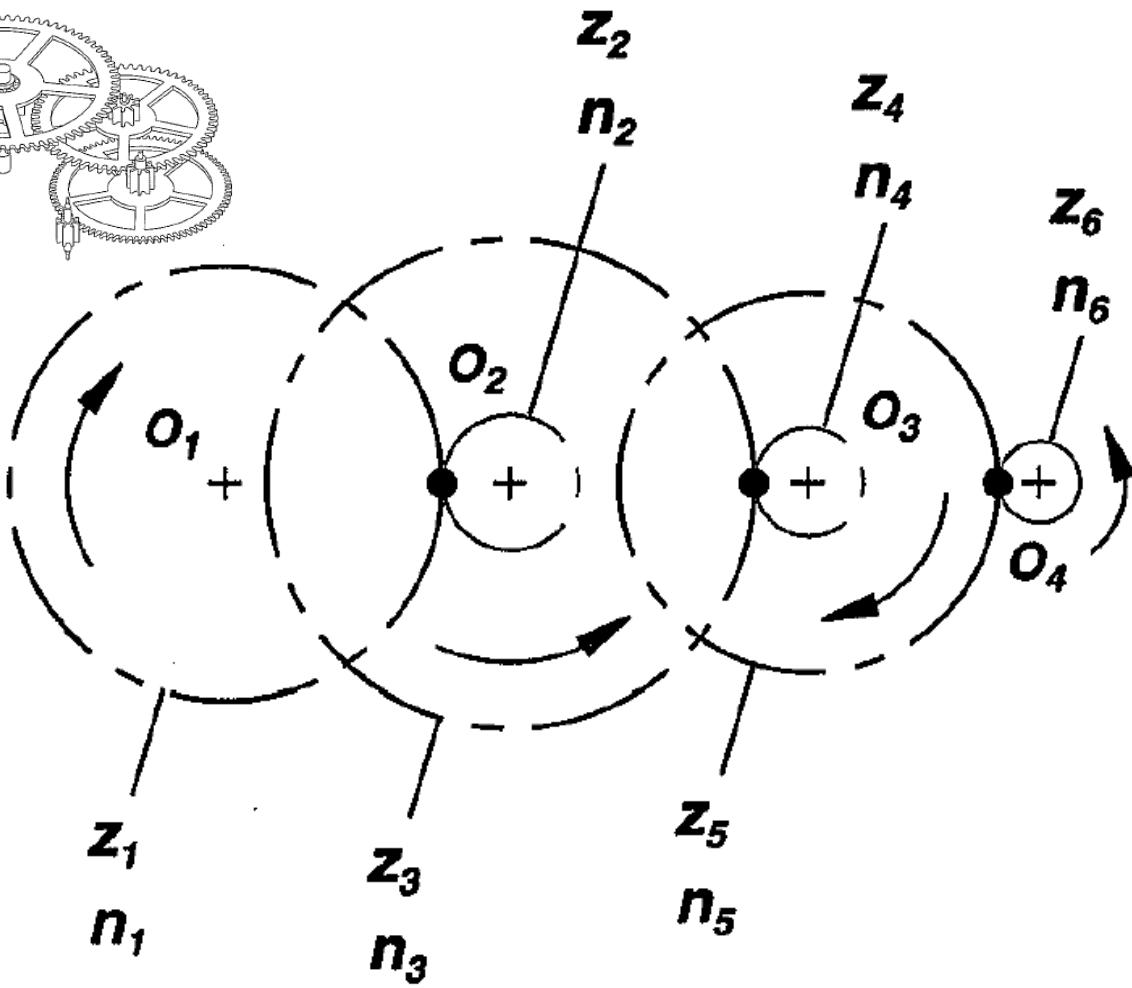
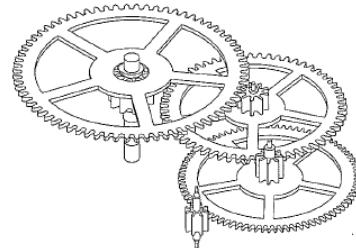
- Tambour de barillet :** boîte cylindrique qui sert de logement au ressort et de pivotement à l'arbre de barillet. Un dégagement opéré sur le diamètre intérieur permet la fixation du ressort pour assurer l'entraînement du tambour.
- Ressort de barillet :** lame logée dans le tambour de barillet.
- Arbre de barillet :** axe pivotant entre pont et platine, permettant la fixation du ressort par le crochet situé sur la bonde.
- Couvercle de barillet :** il ferme la boîte contenant le ressort. Il sert également de pivotement à l'arbre de barillet.

Moment de force [N-mm]



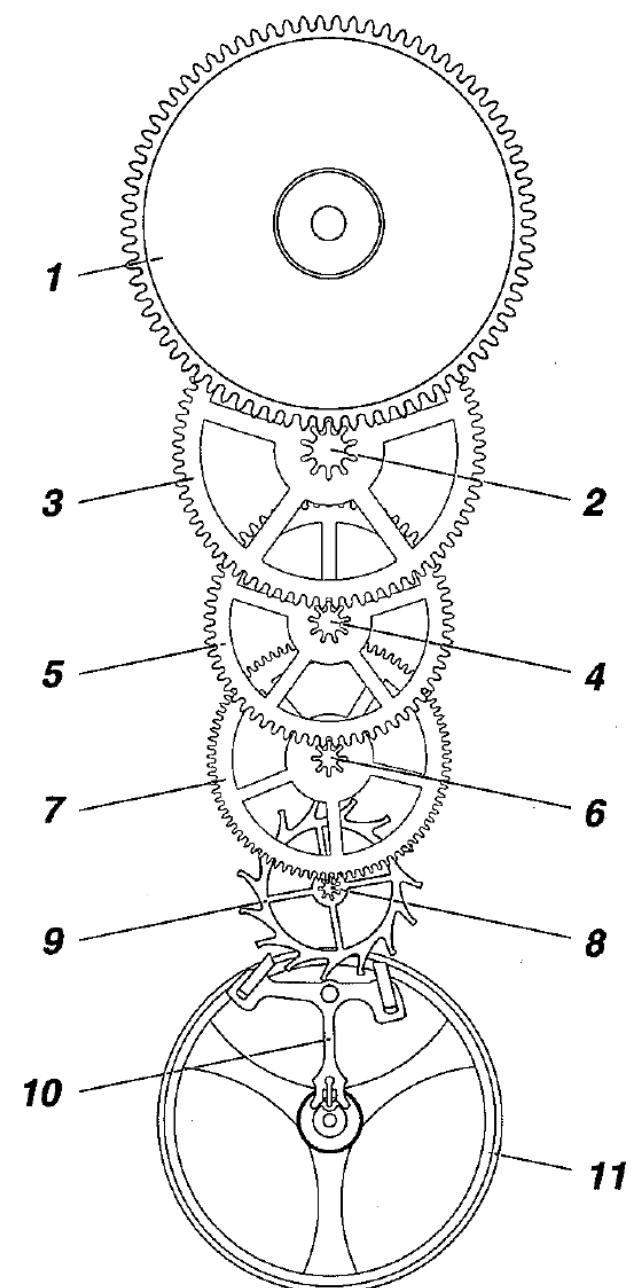
Ressort déroulé hors du tambour de barillet

# Rouage multiplicatif



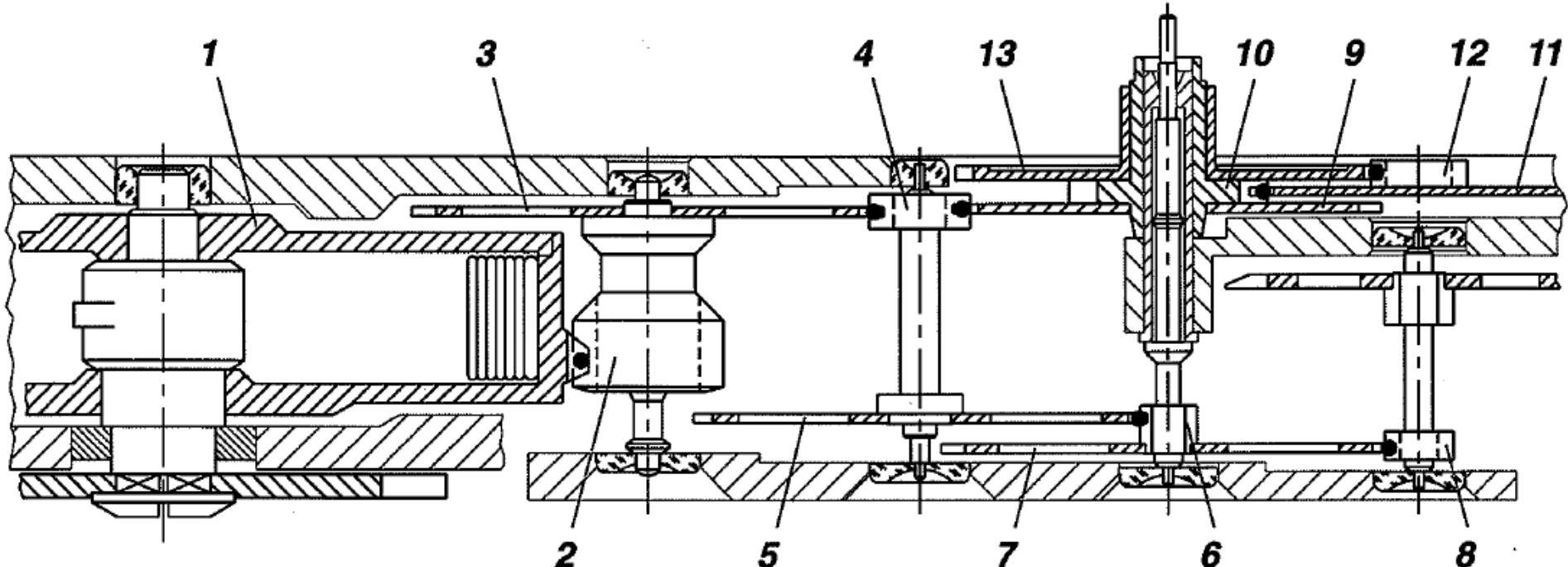
$$\frac{n_6}{n_1} = \frac{z_1 \cdot z_3 \cdot z_5}{z_2 \cdot z_4 \cdot z_6}$$

**Menants ou Menés**      **Roues Pignons**

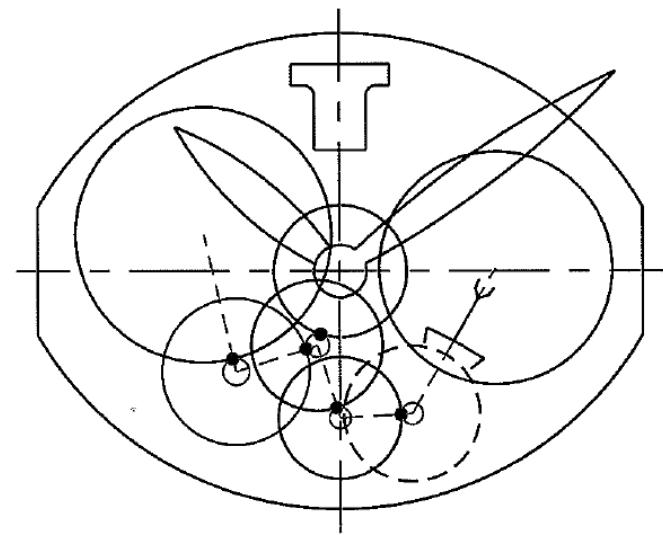


# Organes clés

## Rouage et ponts

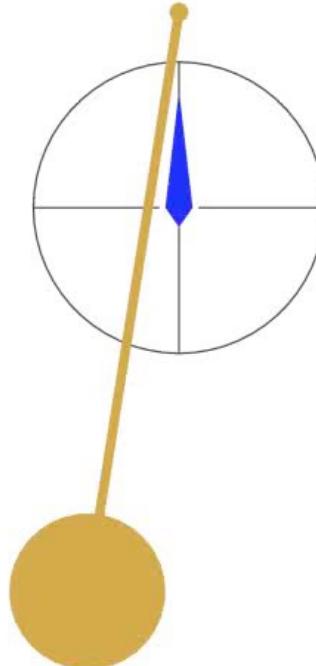


- |          |                              |           |                                   |
|----------|------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| <b>1</b> | <b>Barillet</b>              | <b>9</b>  | <b>Roue d'entraîn. à friction</b> |
| <b>2</b> | <b>Pignon de gde moyenne</b> | <b>10</b> | <b>Chaussée</b>                   |
| <b>3</b> | <b>Roue de gde moyenne</b>   | <b>11</b> | <b>Roue de minuterie</b>          |
| <b>4</b> | <b>Pignon moyenne</b>        | <b>12</b> | <b>Pignon de minuterie</b>        |
| <b>5</b> | <b>Roue moyenne</b>          | <b>13</b> | <b>Roue des heures</b>            |
| <b>6</b> | <b>Pignon de seconde</b>     |           |                                   |
| <b>7</b> | <b>Roue de seconde</b>       |           |                                   |
| <b>8</b> | <b>Pignon d'échappement</b>  |           |                                   |

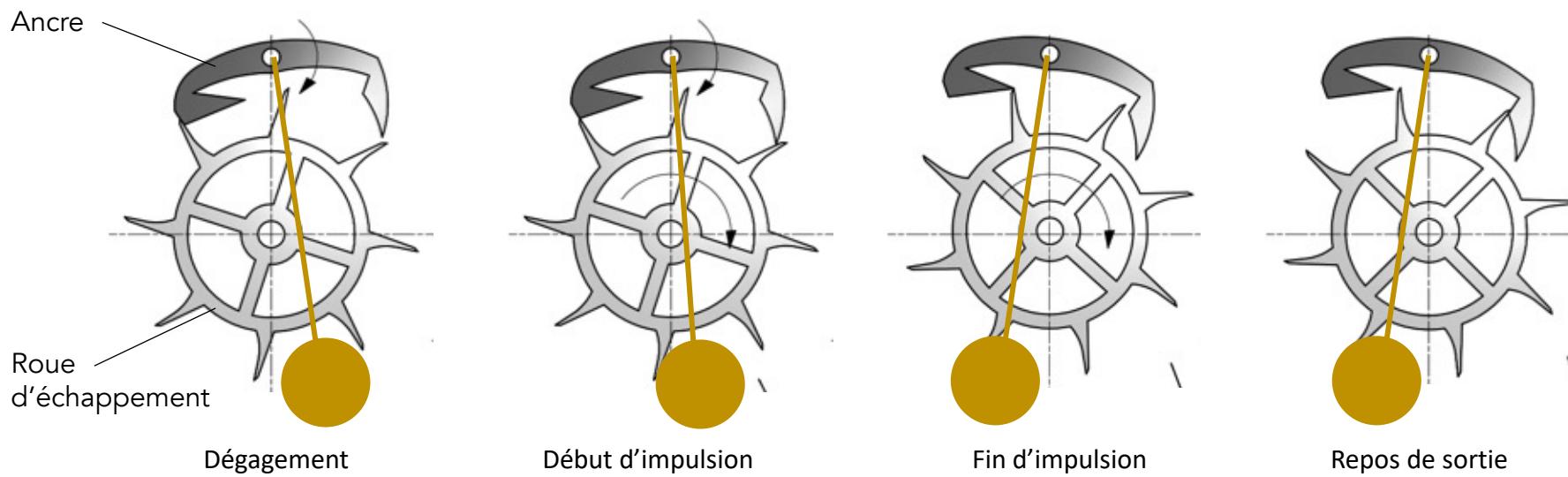


# Echappement

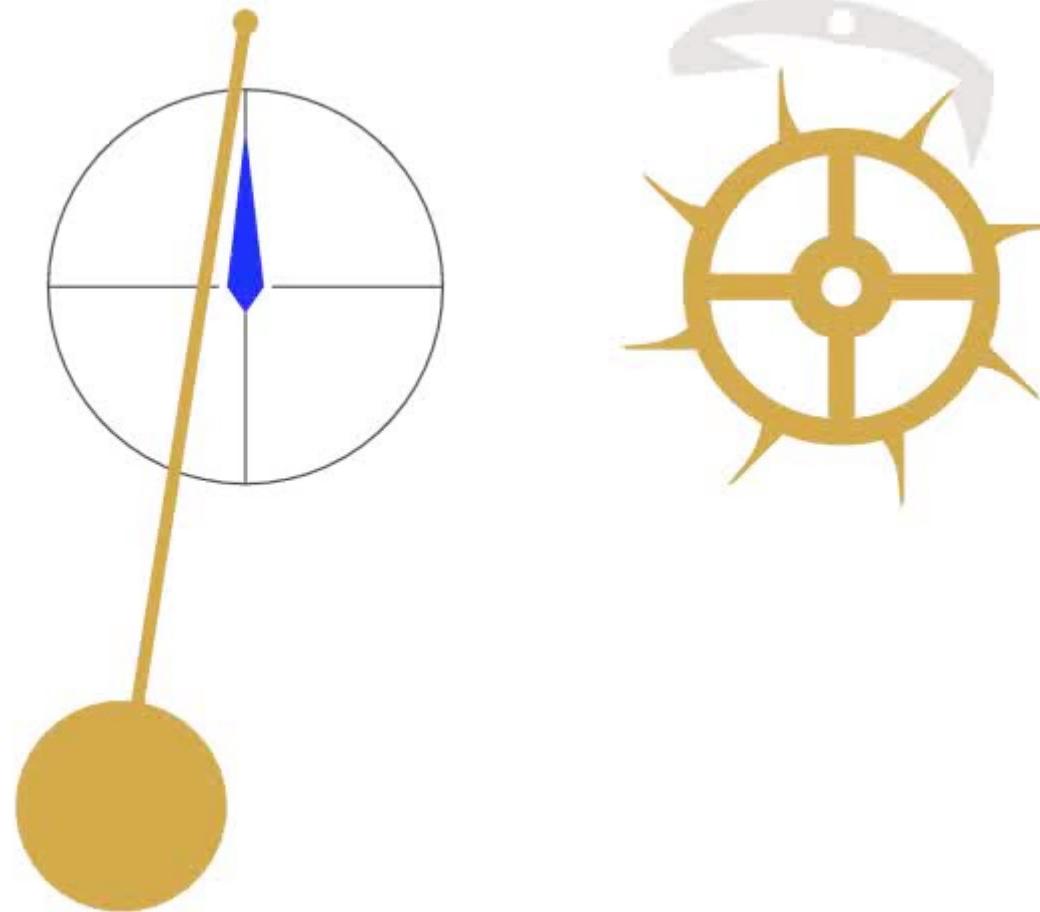
- Interface entre le rouage et l'oscillateur
- Fonctions
  - Compter les oscillations
  - Entretenir les oscillations

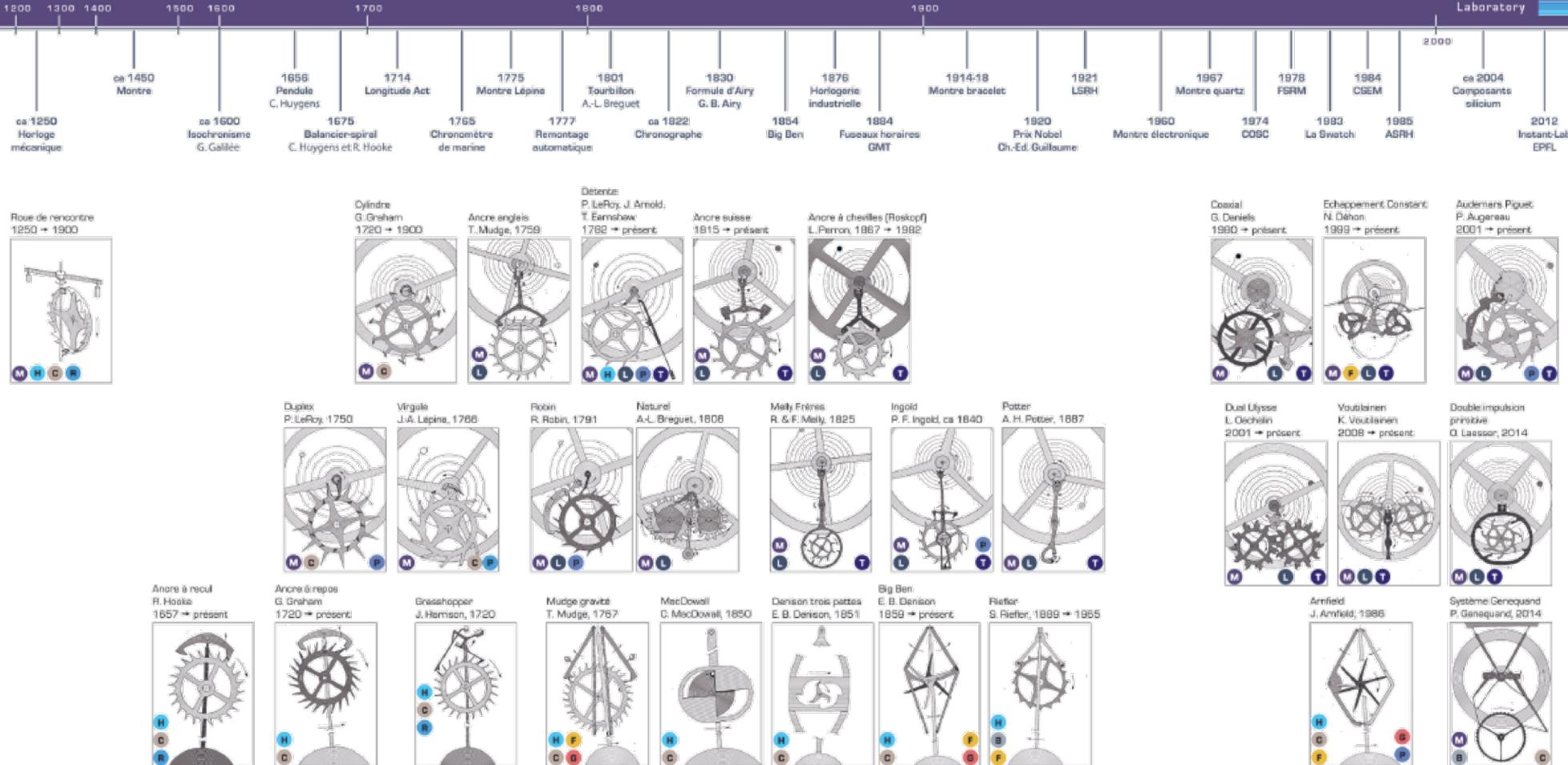


## Exemple de l'échappement de Graham



## Echappement : comptage et entretien





**Légende**

- MONTRE
- HORLOGE
- EXCITATION PAR LA BASE
- CONTACT PERMANENT
- FORCE CONSTANTE
- Gravité
- LIBRE
- Coup perdu
- Récup.
- Tirage

1750 : date estimée d'invention  
1720 → 1900 : durée estimée d'exploitation

**Conçus par**

**Isochronisme**  
La fréquence de l'oscillateur est indépendante de son amplitude. L'isochronisme est la base de l'horlogerie de précision.

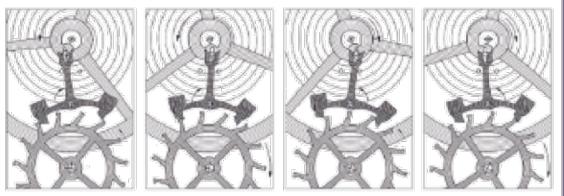
**Échappement libre**  
L'oscillateur n'est en contact avec l'échappement que pendant les dégagements et l'impulsion, ce qui réduit la perturbation de la fréquence de l'oscillateur.

**Échappement à contact permanent**  
L'oscillateur est toujours en contact avec une paire de l'échappement. Le contact permanent est jugé nuisible à la précision des montres.

**Échappement à force constante**  
L'échappement transmet à l'oscillateur, à chaque impulsion, une énergie égale. L'oscillateur travaille à amplitude constante.

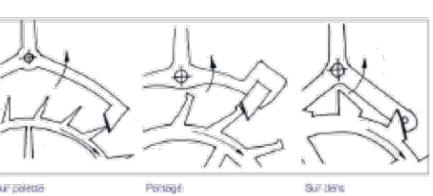
**Tirage**  
Introduit par R. Pendleton aux environs de 1800, il sécurise le fonctionnement de l'échappement par l'introduction d'un angle aux repas des palettes.

## Phases



Dégagement d'entrée Impulsion d'entrée Déplacement de sortie Impulsion de sortie

## Plans d'impulsion



Sur pente Panieré Sur droite

**Bibliographie**

- Bernier en ligne, Fédération horlogère suisse, [www.fts.ch/berner](http://www.fts.ch/berner)
- Paul M. Chamberlain, *It's About Time*, The Holland Press, London, 1964
- George Daniels, *La Montre*, troisième édition, [www.daniels.com/3rd.htm](http://www.daniels.com/3rd.htm)
- Léopold Detressan, *Théorie générale de l'horlogerie*, La Chaux-de-Fonds, 1950
- Charles Gros, *Échappements d'horloges et de montres*, Watchmakers Publishing, 2013
- Tardy, *Le montre, les échappements recul, respirat, la compensation*, Paris, 1968
- Edmund Beckett Denison, *A Rustumary Treatise on Clocks/Watches & Coils*, 8th ed., London 1903, [www.gutenberg.org/files/17578](http://www.gutenberg.org/files/17578)

**Autour de**

Roland Bütler, Sébastien Hennin, Olivier Lüscher, Béatrice Nussbaumer, *La Vérité*  
ILLUSTRATIONS : OLEH LAZER  
GRAPHIQUE : BEGOÑA TORO

## Echappement libre à ancre

Introduit en 1769 par Thomas Mudge et utilisé depuis dans la plupart des montres mécaniques

Mouvement intermittent.

Le mécanisme est à l'arrêt 90 % du temps.

Echappement libère le mouvement 8 fois par seconde.

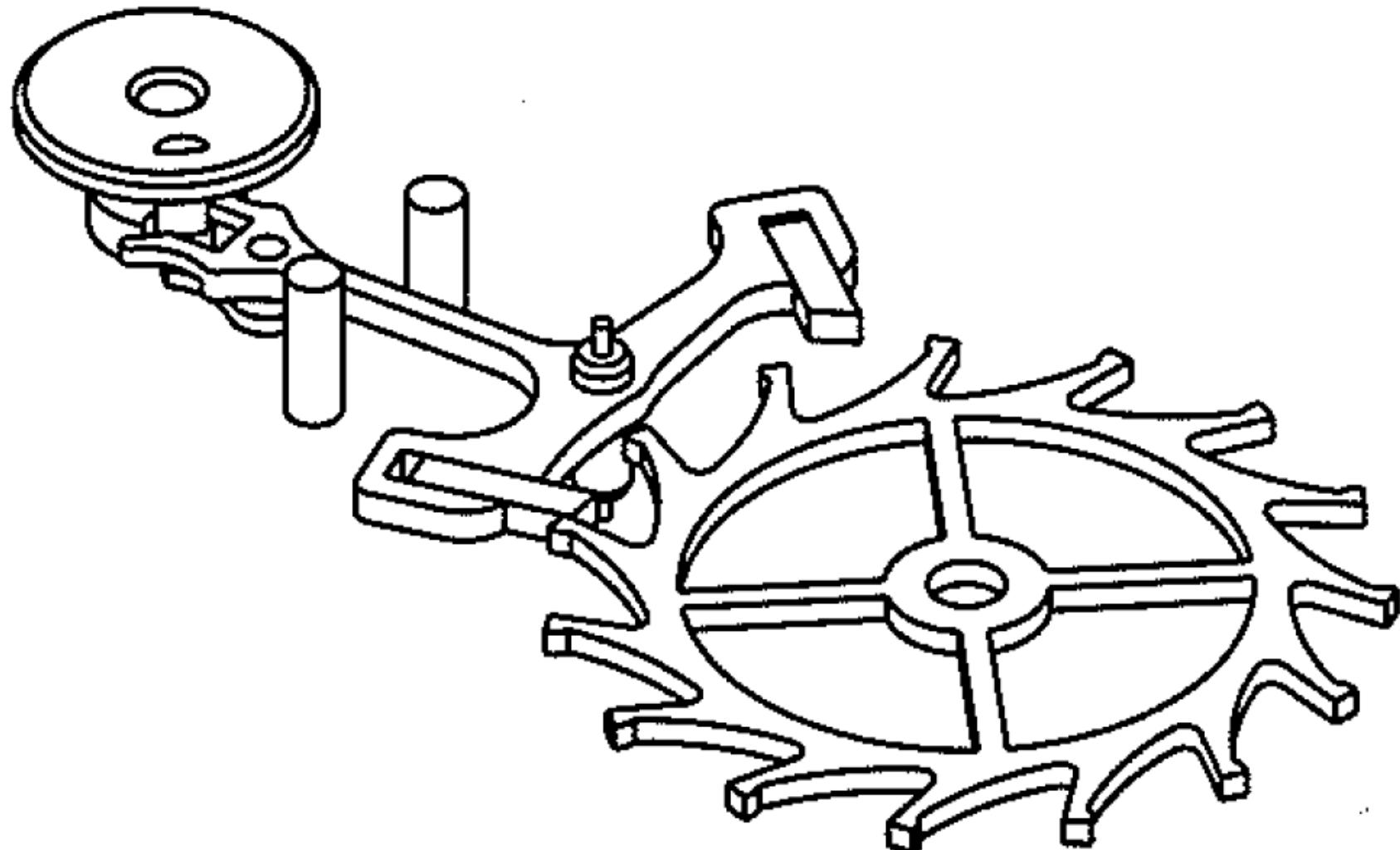
Action échappement prend 1/100 seconde.

Cauchemar de circulation routière.

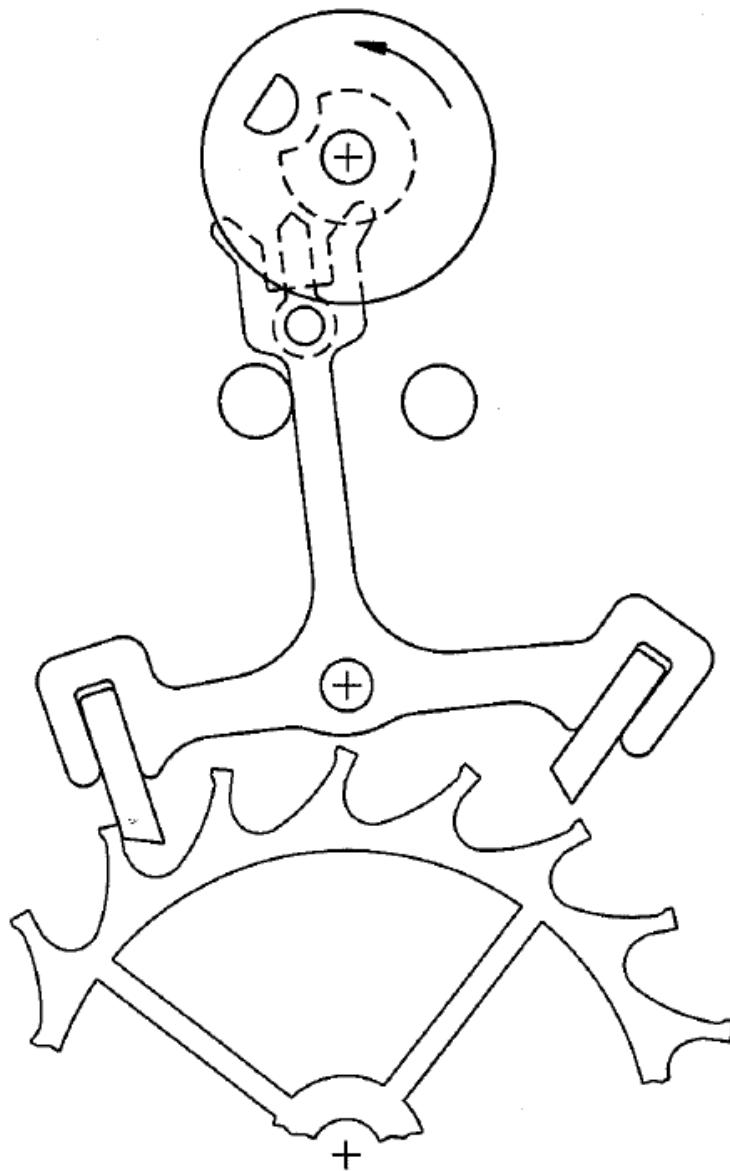
Mais retient l'avantage de minimiser la perturbation de l'oscillateur.

C'est un *échappement libre* (à 90 %) qui augmente la précision chronométrique.

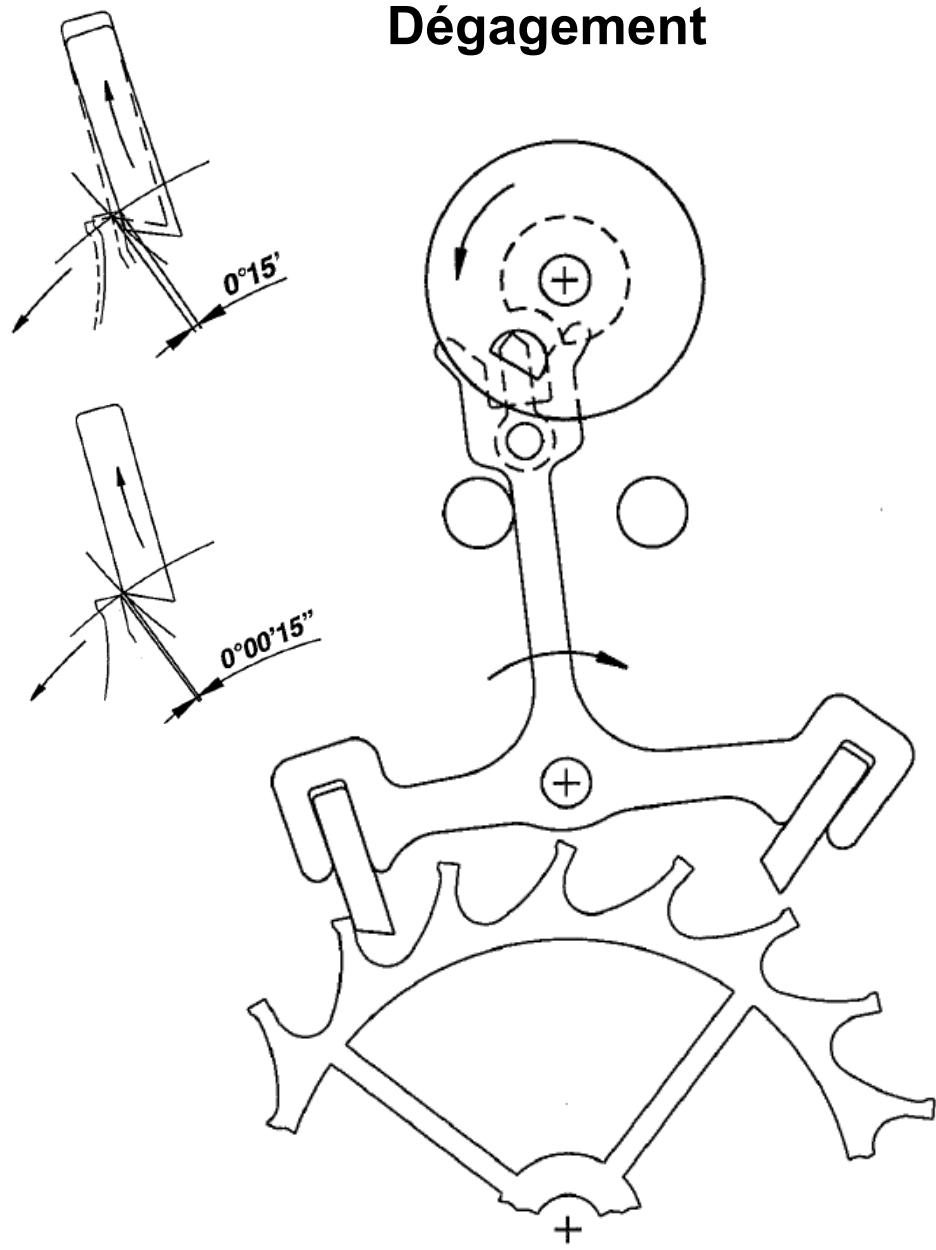
## Echappement à ancre-suisse



**Repos**

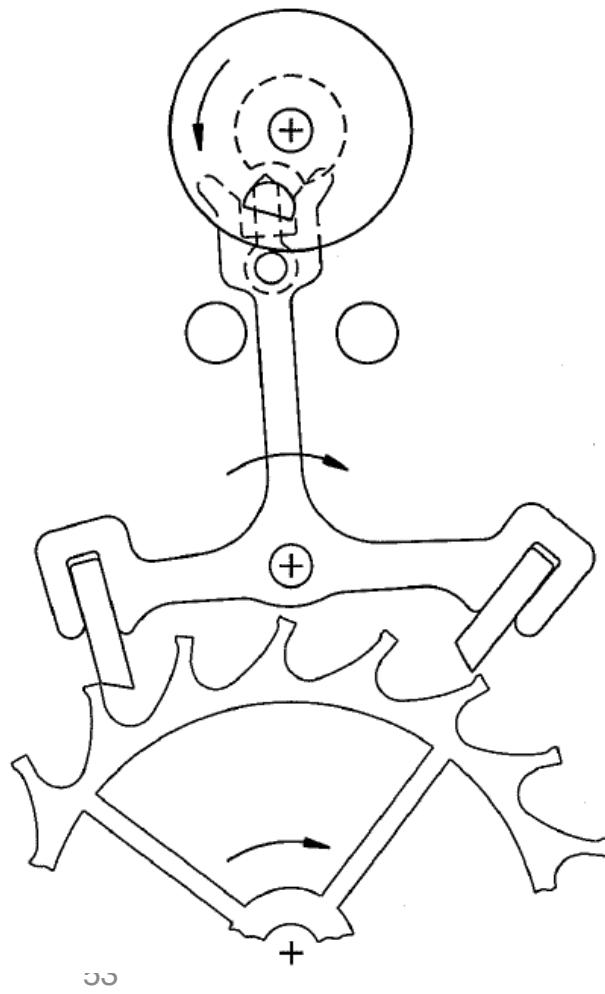


**Dégagement**

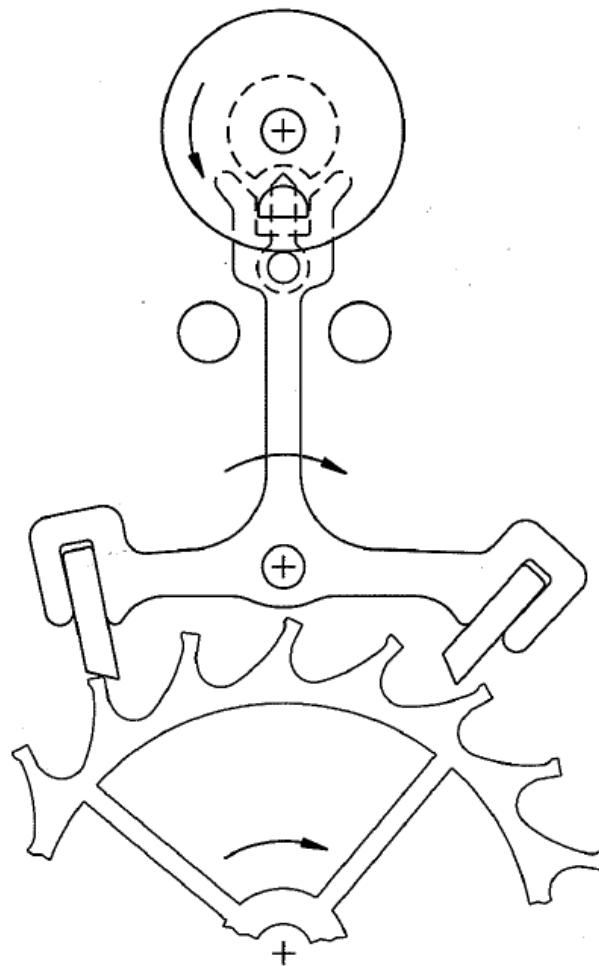


# Impulsion

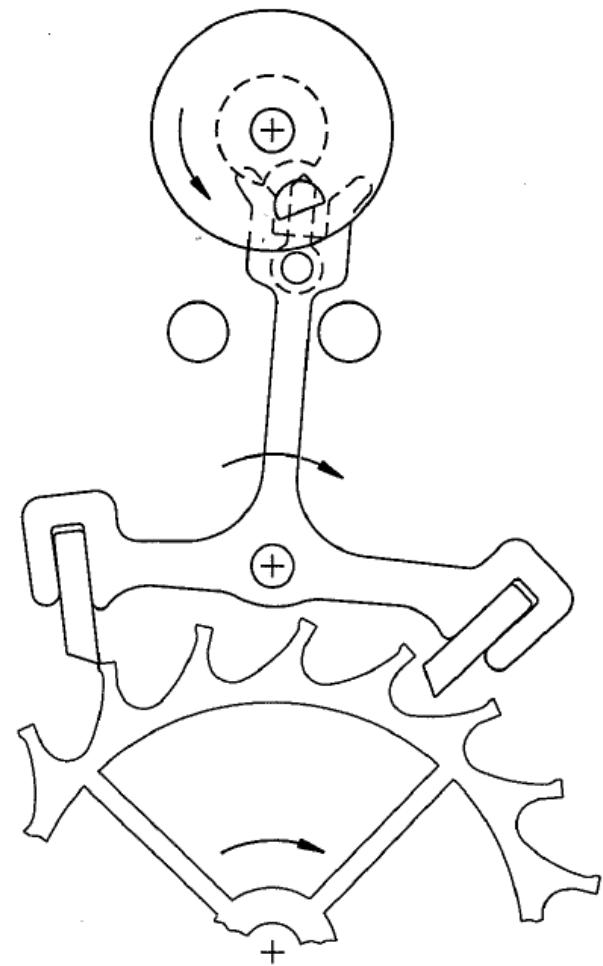
Début



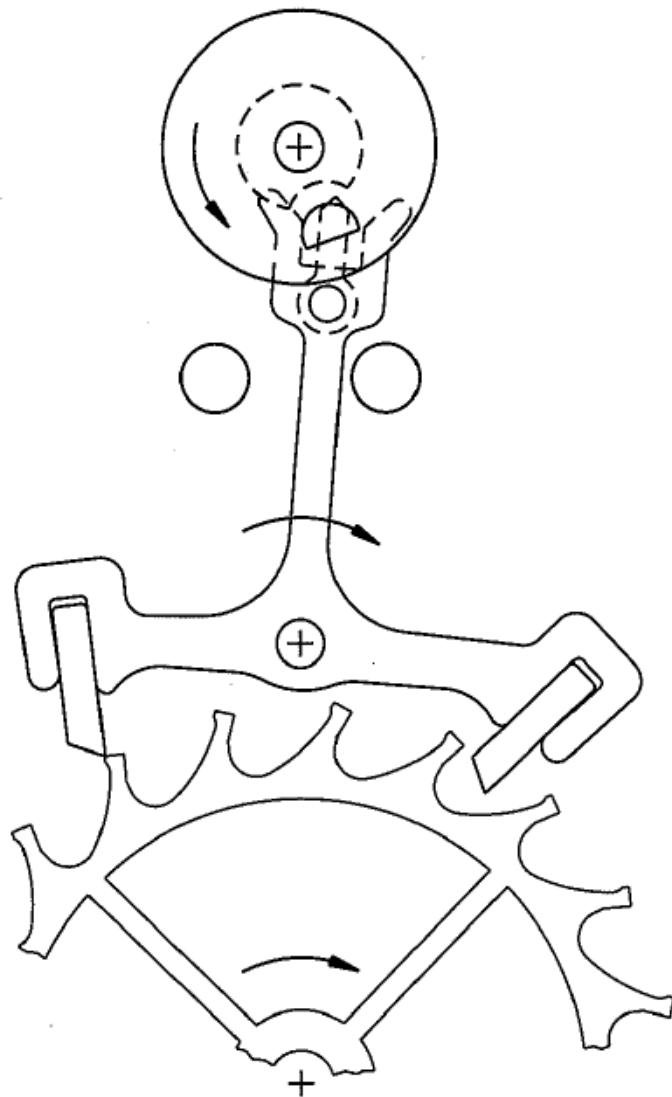
Point mort



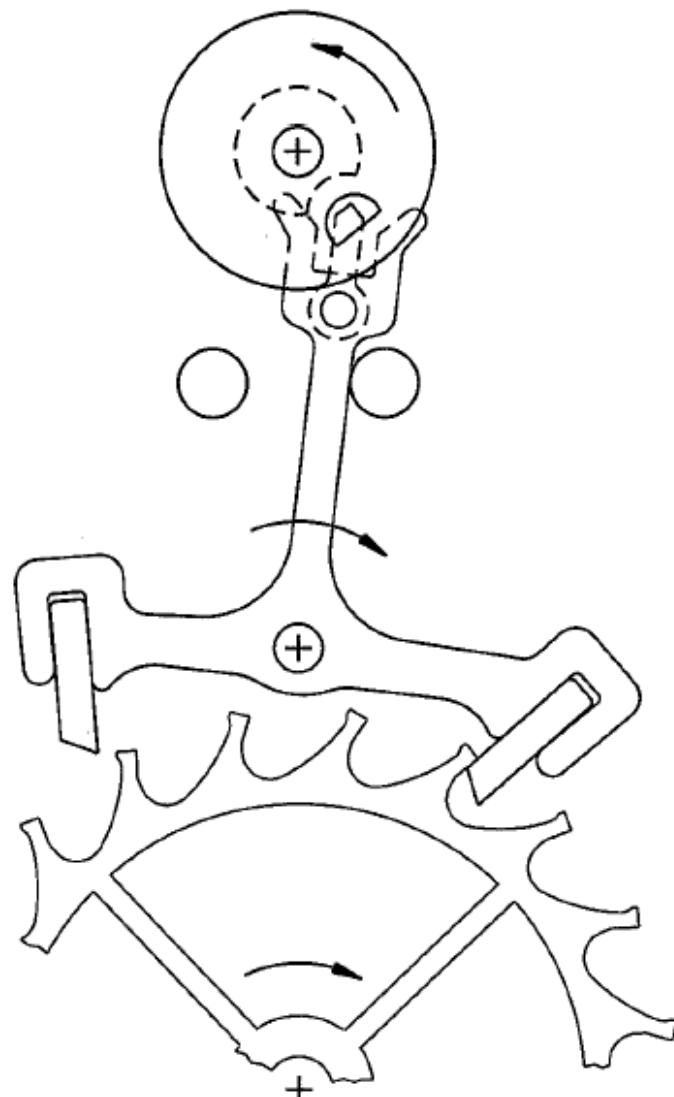
Fin



**Chute**



**Repos**



## Sollicitations auxquelles est soumise une montre bracelet

- Orientation quelconque par rapport à la gravité (pendule et poids pas utilisables)
- Chocs au porter (utilisation d'anti-chocs protégeant les pivots de très faible diamètre)
  - 25 à 500 g ( $1 \text{ g} = 9.81 \text{ m/s}^2$ )
- Chute de 1m sur sol en bois dur
  - 5000 g
- Températures
  - Au porter : 8°C à 38°C
  - En dépôt : -20°C à 70°C
- Magnétisme
  - 4800 A/m

# Compensation des effets thermiques

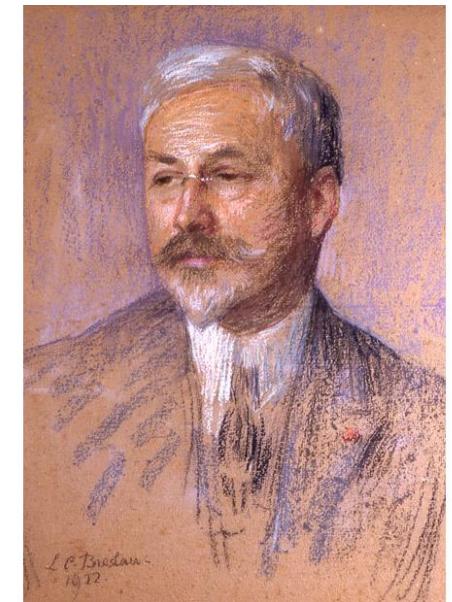
Conceptuellement, la montre mécanique n'a pas changé depuis 1800.

La montre mécanique actuelle est très supérieure.

Avancées en matériaux et en industrialisation (19ème siècle).

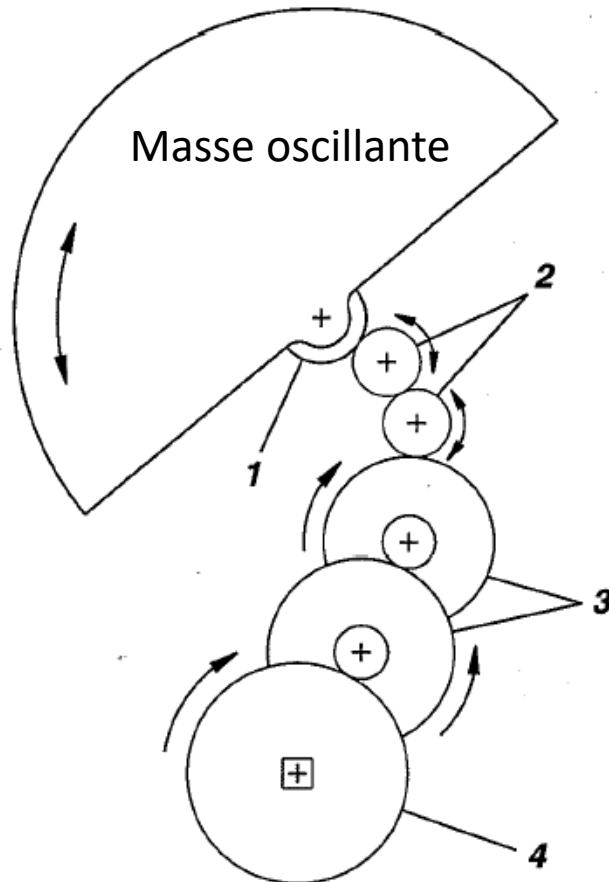
La température modifie l'oscillateur  $\Rightarrow$  erreur chronométrique.

Charles-Edouard Guillaume (Fleurier) invente l'Invar, métal insensible à la température et résout le problème.  
Prix Nobel 1920.



# Remontage automatique

(récolte d'énergie «energy harvesting»)



Rapport de réduction typique: 1: 140

- 1 **Pignon de la masse oscillante**
- 2 **Mobiles intermédiaires (redresseurs de sens)**
- 3 **Mobiles de réduction**
- 4 **Rochet**



Photo d'un module de remontage *automatique*

# Complication: affichage supplémentaire à h, m, s

- *Quantième*: date (devant être corrigée pour les mois avec moins de 31 jours), jour de la semaine
  - *Quantième annuel*: date ne nécessitant qu'une correction une fois par an le 29 février (3 ans sur 4)
  - *Quantième perpétuel*: date avec prise en compte des années bissextiles, un mobile fait un tour en 4 ans
- Phases de lune
- Chronographe (différent de chronomètre)
- Sonnerie, répétition, grande sonnerie (grandes complications)
- Tourbillon (compliqué mais n'est pas une complication au sens de la définition ci-dessus)



Calibre 89, Patek Philippe

temps sidéral  
second fuseau horaire  
heure du lever du soleil  
heure du coucher du soleil  
équation du temps  
quantième perpétuel séculaire  
correcteur année bissextile  
siècle  
décennie  
année  
années bissextile  
saison  
équinoxe  
solstice  
indications zodiacales  
carte stellaire

phases de lune  
âge de la lune  
indication de la date de Pâques  
chronographe à seconde ratrappante  
compteurs minutes chronographiques  
compteurs heures chronographiques  
carillon Westminster  
grande et petite sonnerie  
alarme  
indicateur de position de la couronne de remontage  
thermomètre  
(tourbillon)  
réserve de marche

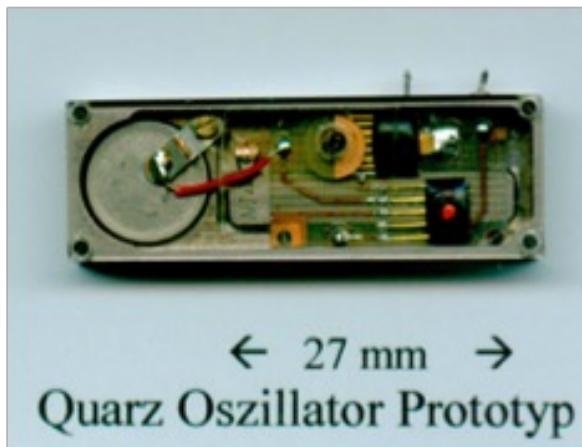
## La montre à quartz

**1880.** Pierre et Jacques Curie découvrent la *piézoélectricité* : l'électricité fait vibrer un cristal de quartz et sa vibration crée de l'électricité.

Le quartz est le Graal horloger : l'entretien et le comptage se font par l'électronique.

**Juillet 1967.** La première montre à quartz est inventé à Neuchâtel par Armin Frei dans notre bâtiment.

La précision est amélioré par un facteur de 10 et le coût diminué d'un facteur de 10.



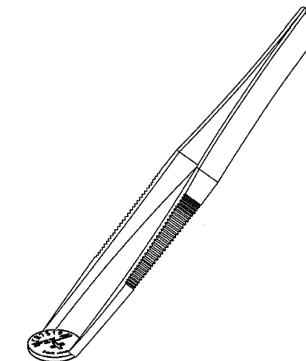
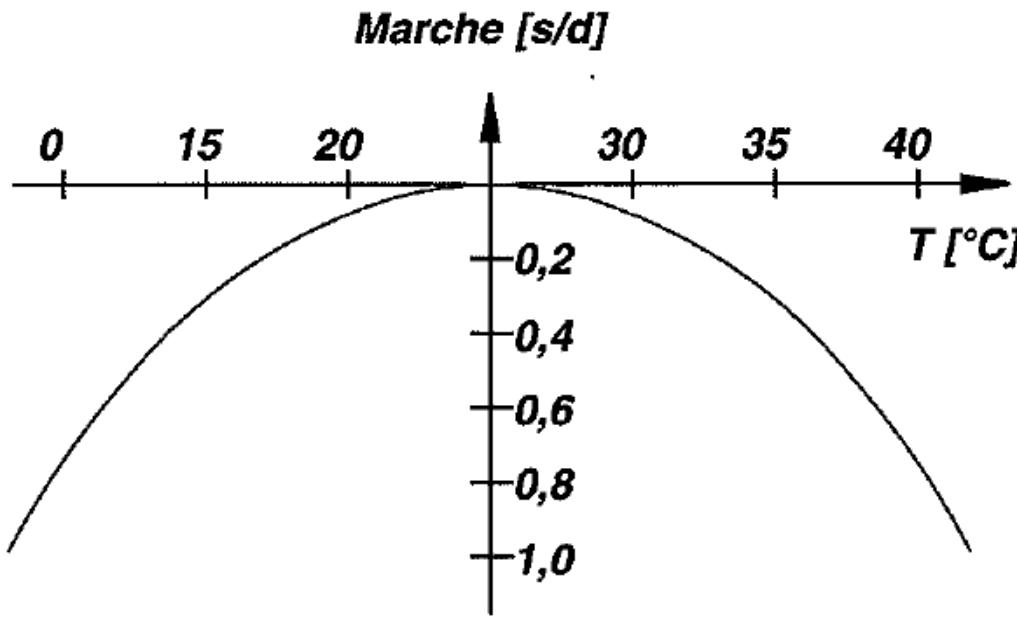
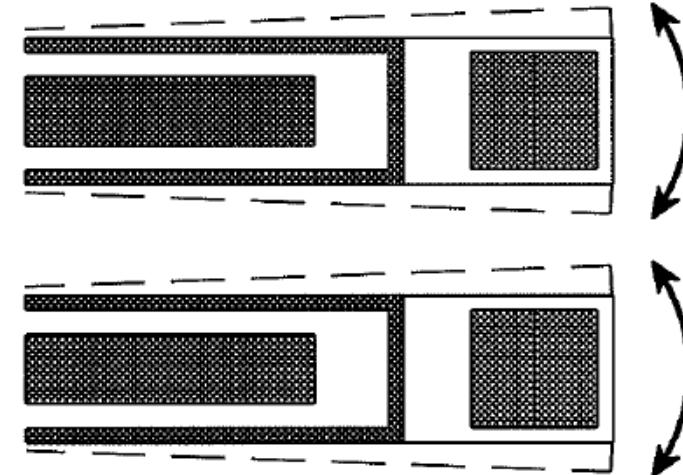
Aperçu de la montre électronique

# La montre électronique à affichage digital



Quartz

$$2^{15} = \mathbf{32\ 768\ Hz}$$



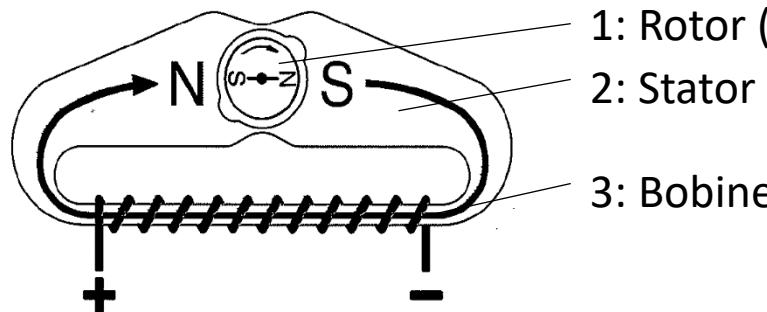
10:00

# Aperçu de la montre électronique

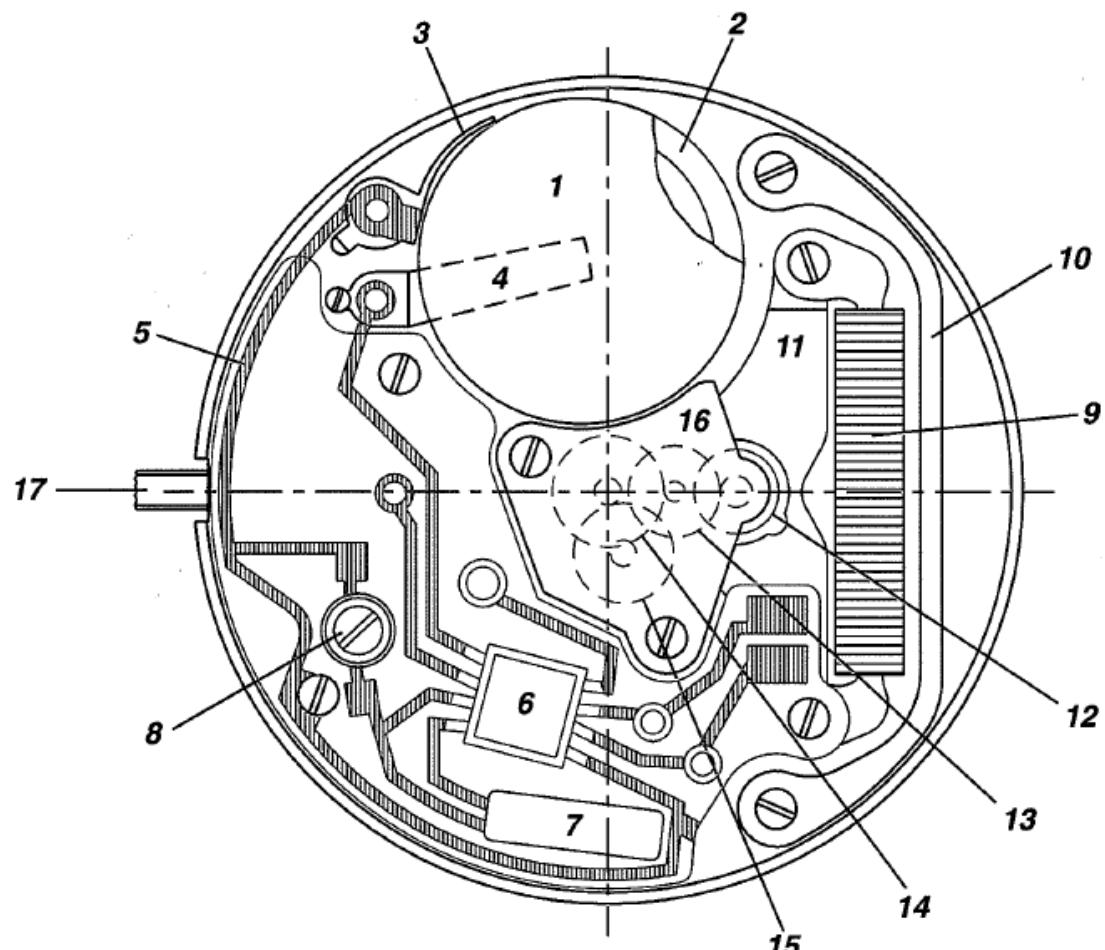
## Montre électronique à affichage analogique

- 1 Pile
- 2 Isolateur de pile
- 3 Bride positive de la pile
- 4 Bride négative de la pile
- 5 Circuit imprimé
- 6 Circuit intégré
- 7 Quartz
- 8 Trimmer
- 9 Bobine
- 10 Ecran magnétique
- 11 Stator
- 12 Rotor
- 13 Mobile intermédiaire
- 14 Mobile de seconde
- 15 Mobile moyenne
- 16 Pont de rouage
- 17 Tige de mise à l'heure

## Moteur Lavet (Marius Lavet)



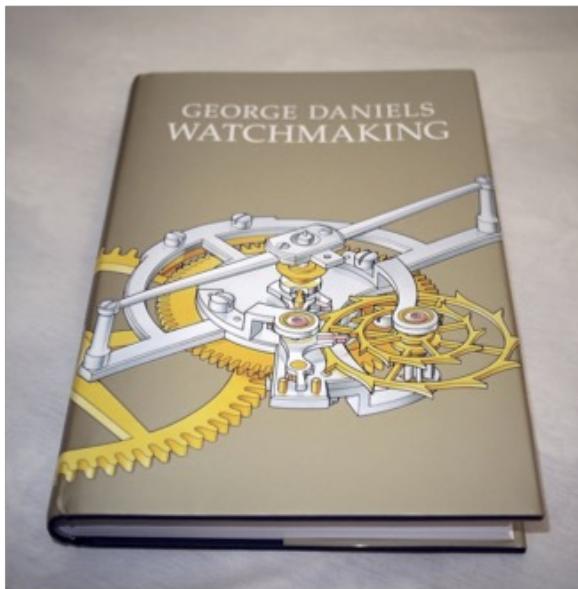
- 1: Rotor (aimant permanent)
- 2: Stator ferromagnétique
- 3: Bobine



# Renaissance de la montre mécanique

Malgré la mort annoncée de la montre mécanique et la crise des 1970's, la montre mécanique domine le chiffre d'affaire de l'horlogerie suisse.

Innovations techniques récentes. Nouvel échappement co-axial de George Daniels.



## DÉFINITIONS.

Pour les éviter, il faut distinguer le temps, l'espace, le lieu, & le mouvement, en absolus & relatifs, vrais & apparens, mathématiques & vulgaires.

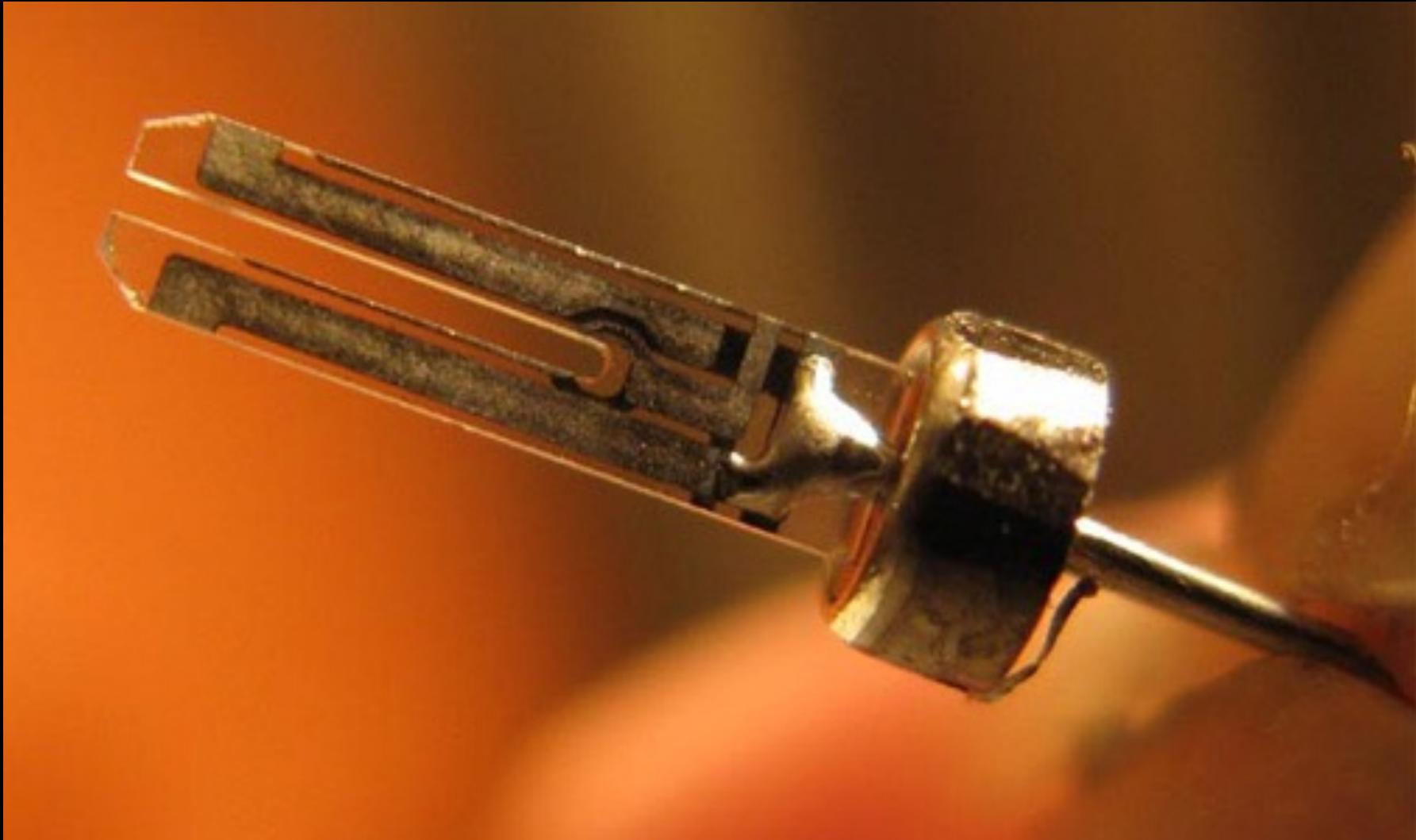
I. Le temps absolu, vrai & mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément, & s'appelle *durée*. Le temps relatif, apparent & vulgaire, est cette mesure sensible & externe d'une partie de durée quelconque (égale ou inégale) prise du mouvement: telles sont les mesures d'heures, de jours, de mois, &c. dont on se sert ordinairement à la place du temps vrai.

II. L'espace absolu, sans relation aux choses externes, demeure toujours similaire & immobile.

L'espace relatif est cette mesure ou dimension mobile de l'espace absolu, laquelle tombe sous nos sens par sa relation aux corps, & que le vulgaire confond avec l'espace immobile. C'est ainsi, par exemple, qu'un espace, pris au dedans de la terre ou dans le ciel, est déterminé par la situation qu'il a à l'égard de la terre.

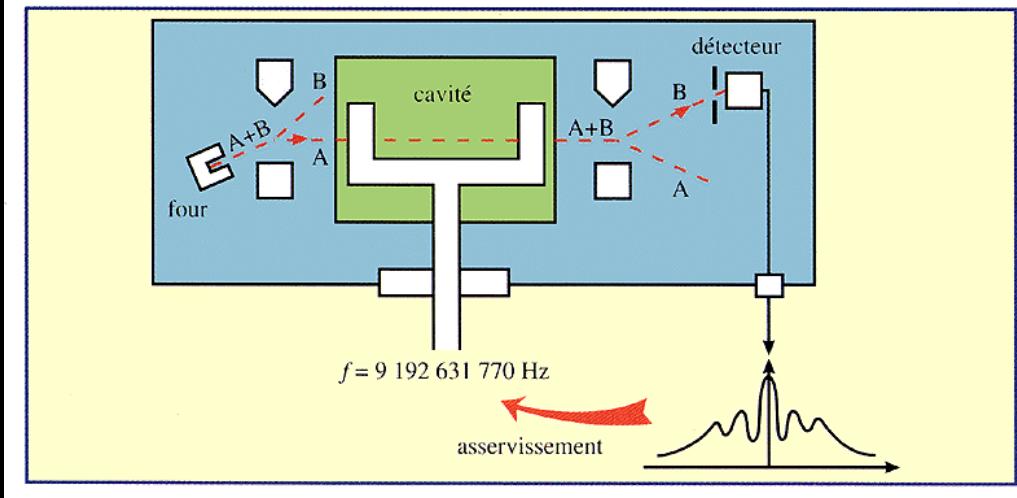
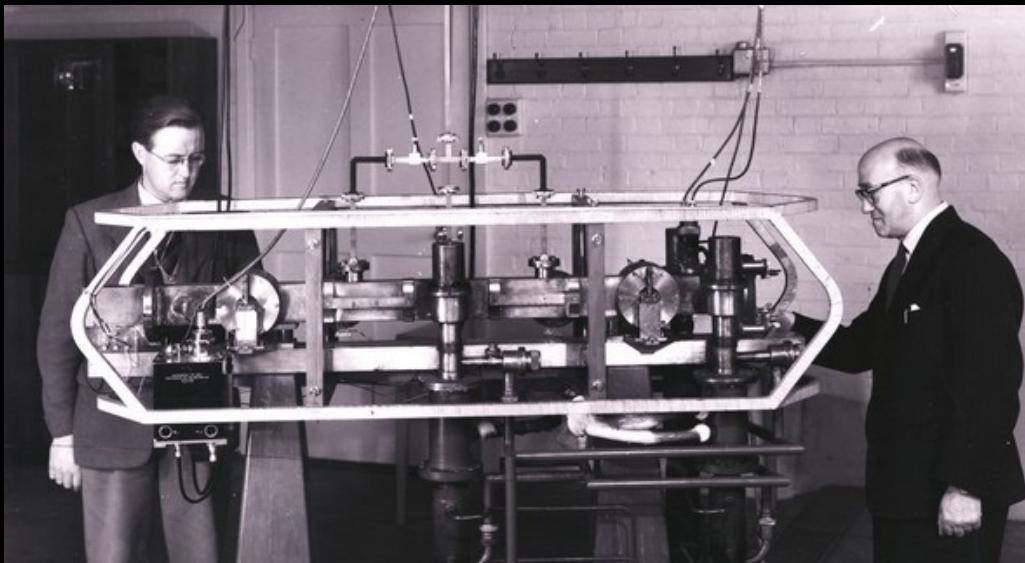
*Ressort diapason en quartz  
pour montres électroniques*

*Neuchâtel 1967*



# *L'horloge atomique au césium (sans ressort)*

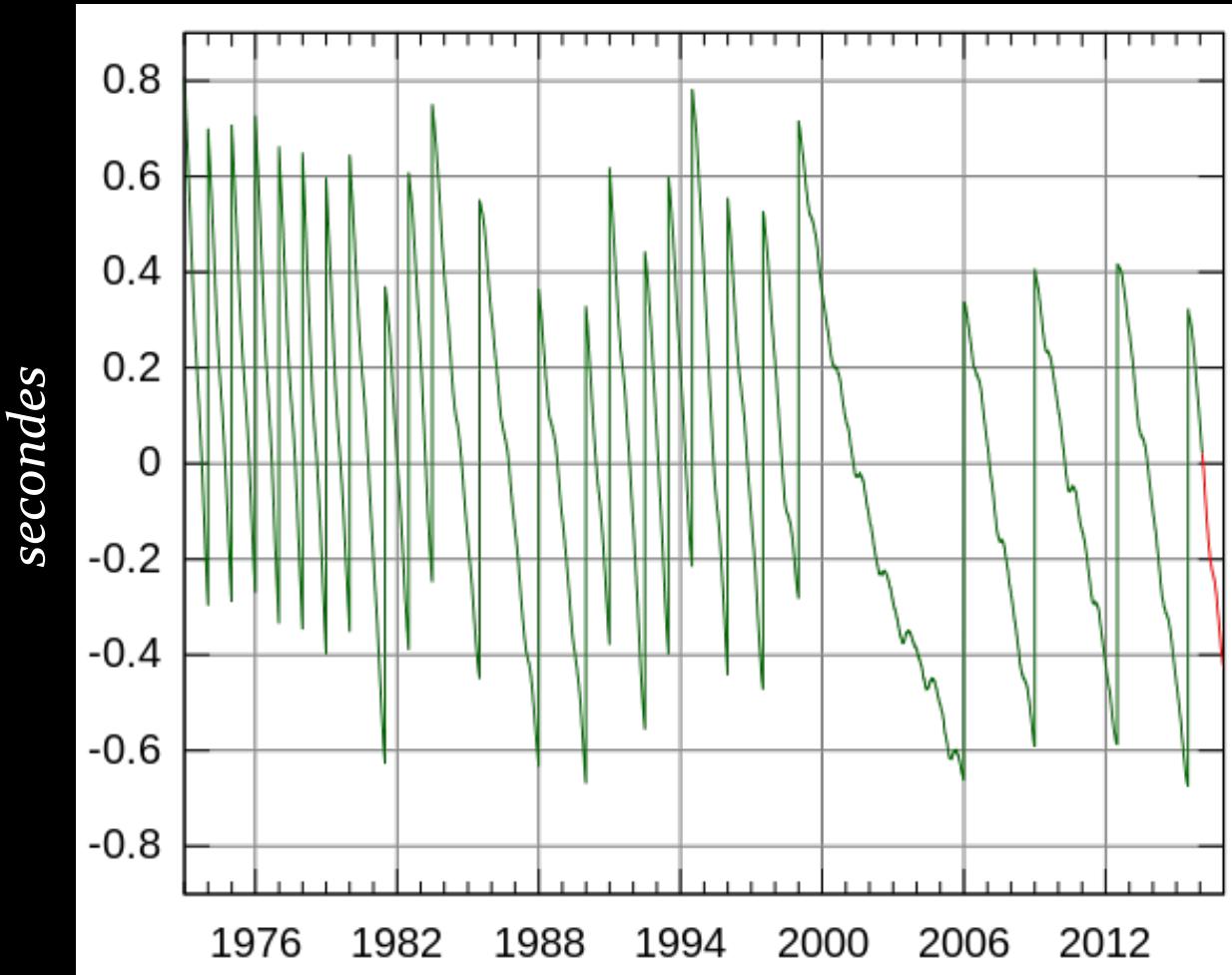
1955



*Précision d'une seconde sur 160 million d'années*

# *Secondes intercalaires*

... - 23:59:58 - 23:59:59 - **23:59:60** - 00:00:00 - ....

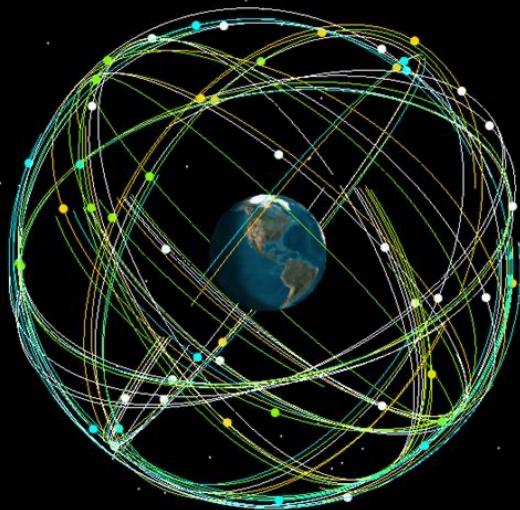


*26 secondes ajoutées  
depuis 1976 pour  
recaler UTC sur UT1*

*Dernière en date  
31 décembre 2016,  
23:59:60*

*Différence entre les temps UT1 (temps astronomique) et UTC (temps artificiel)*

# *Temps du GPS et théorie de la relativité*



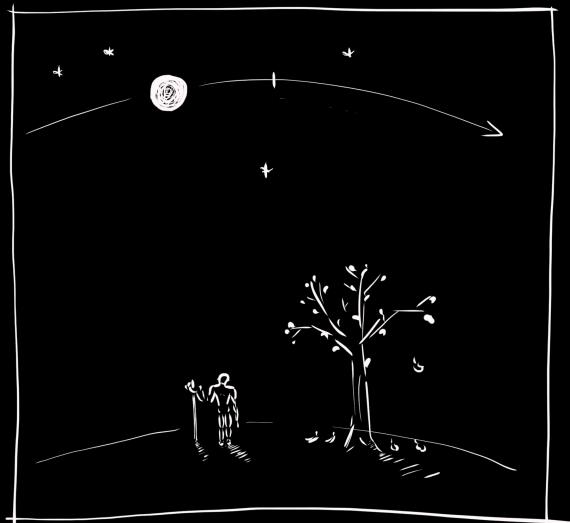
*Horloge du satellite par rapport à l'horloge terrestres  
(pas de secondes intercalaires):*

- *7 µs/jour de retard en raison de sa vitesse relative*
- *45 µs/jour d'avance en raison de la gravité de la terre*

*Bilan:  $45 - 7 = 38 \mu s/jour$  d'avance*

*Sans correction, ceci résulterait en  
une erreur de positionnement de **10 km** pour un jour*

# *Le temps « universel »*

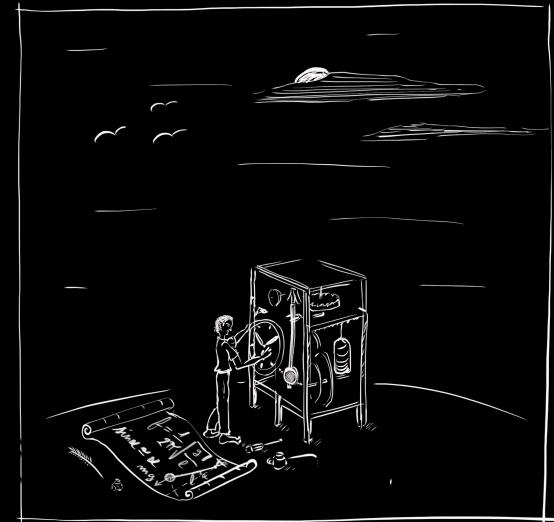


Temps astronomique

*Temps solaire réel (antiquité)*

↓  
*Temps des éphémérides (ET) (1952)*

↓  
*Temps Universel (UT1)*



Temps artificiel

*Horloge à pendule (XIXe)*

↓  
*Horloge atomique (1967)*

↓  
*+ secondes intercalaires*

↓  
*Temps Universel Coordonné (UTC)*

## *Les Pulsars millisecondes*



*Tournent sur eux-même plusieurs centaines de fois par seconde avec une régularité comparable à celle d'une horloge atomique*

# Exercice 1

Calculez le rendement de l'échappement d'une montre mécanique sachant que:

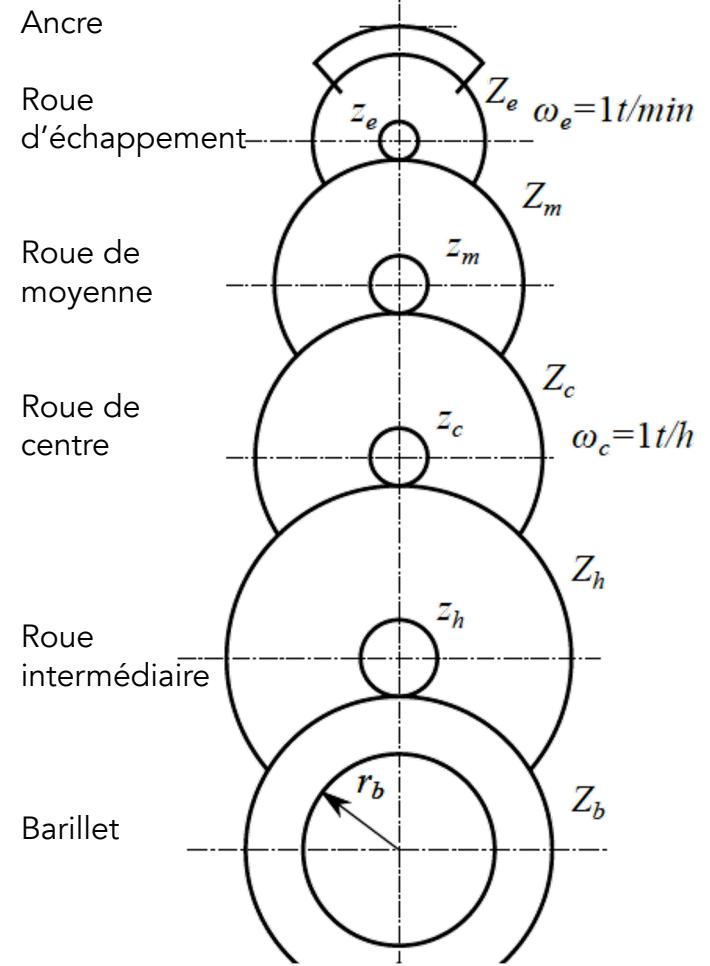
- Le barillet tourne à une vitesse de 4.2 tours par jour et développe un couple de 5.5 mNm
- Le rendement de la transmission par engrenage, du barillet à la roue d'échappement, est de 0.93<sup>4</sup>
- Le facteur de qualité du balancier spiral est  $Q = 300$
- L'amplitude des oscillations du balancier est de  $220^\circ$
- La fréquence du balancier spiral est de 4 Hz
- L'inertie du balancier est  $J = 1 \cdot 10^{-9} \text{ kg m}^2$

Démarche :

1. Calculer la puissance dissipée par le balancier spiral:  $P_{\text{balancier}}$  (énergie perdue lors d'une oscillation libre amortie durant une période)
2. Calculer la puissance qui est transmise à la roue d'échappement via le train d'engrenage:  $P_{\text{échappement}}$
3. Calculer le rendement de l'échappement :  $\eta = P_{\text{balancier}} / P_{\text{échappement}}$

# Exercice 2

- Soit un pendule doté des propriétés suivantes:
  - Facteur de qualité :  $Q = 2000$
  - Période :  $T = 2s$  ( $\omega_0 = 2\pi/T$ )
  - Masse :  $m = 0.8 kg$
- Quelle est la puissance  $P_p$  nécessaire pour le maintenir à une amplitude de  $A = 6^\circ$  ?
- On alimente le pendule avec un échappement et un rouage tel que définit ci-contre. On admet un rendement de  $\eta_e = 40\%$  à l'échappement et de  $\eta_r = 80\%$  au rouage complet.  
Quelle est la puissance  $P_b$  requise au barillet pour apporter la puissance  $P_p$  au pendule?
- Quelle masse faut-il donner au poids suspendu à une corde enroulée autour du tambour de rayon  $r_b = 70 mm$ ?



Roue $i$	Dents $Z_i$	Ailes $z_i$	Rotation $\omega_i$
Echappement	30	10	1 t/min
Moyenne	75	10	
Centre	80	12	1 t/h
Intermédiaire	105	14	
Barillet	120		