



► **Document 1 (+ vidéos) : Harrison et la quête de la longitude**

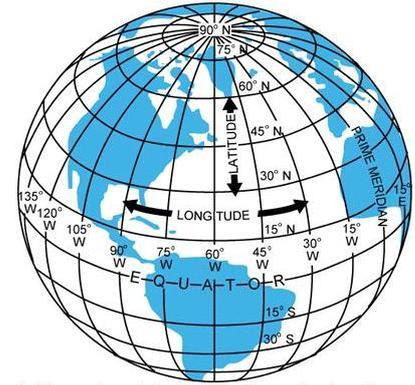
Le Longitude Act est une loi du parlement britannique de 1714 offrant un prix de 20000 livres (une somme considérable pour l'époque) à celui ou celle qui déterminerait une méthode simple et sûre pour permettre la détermination de la longitude d'un navire en pleine mer.

Si la mesure de la latitude a toujours été relativement facile grâce à la mesure de la hauteur de l'étoile polaire ou du soleil, la détermination de la longitude présente de réels problèmes pratiques en haute mer.

En 1707, l'amiral Cloudesley Shovell, naviguant par temps de brouillard au nord des îles Scilly, pensait qu'il naviguait en pleine mer. La flotte s'échoua et plus de 2000 hommes moururent. Cet accident, conjugué à la volonté britannique de suprématie maritime, fut à l'origine du "prix de la longitude".

Pendant de longues décennies, plusieurs personnes ont tenté de remporter le prix. Il fut enfin gagné par John Harrison, un horloger. Alors que tous les efforts précédents pour déterminer la longitude s'orientaient vers la méthode des distances lunaires (position de la lune par rapport à des étoiles), Harrison s'efforça de construire une horloge de précision capable de garder l'heure du port d'origine.

Il commença en 1730 à construire plusieurs chronomètres de marine et atteint finalement en 1761 la précision nécessaire pour remporter le prix. Son chronomètre (photographie ci-contre) avait alors une dérive de l'ordre de 0,5s par jour. La connaissance précise de l'heure avec l'observation de la hauteur du soleil permit ainsi de déterminer la longitude en mer.



► **Document 2 : Le pendule et la pendule**

Une pendule (horloge à balancier) utilise les oscillations d'un pendule (balancier), le plus souvent métallique.

Pour de petites oscillations, un pendule de longueur L a une période $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ avec g valeur du champ de pesanteur.

- Coefficient de dilatation thermique des métaux: la variation relative de longueur des métaux sous l'effet des changements de température est comprise entre 1.10^{-6} et $20.10^{-6}K^{-1}$. Il est de $17,5.10^{-6}K^{-1}$ pour le bronze.

Expression de la longueur L d'un balancier en métal en fonction de la température :

$$L = L_0 + \Delta L = L_0 (1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_0)) = L_0 (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$

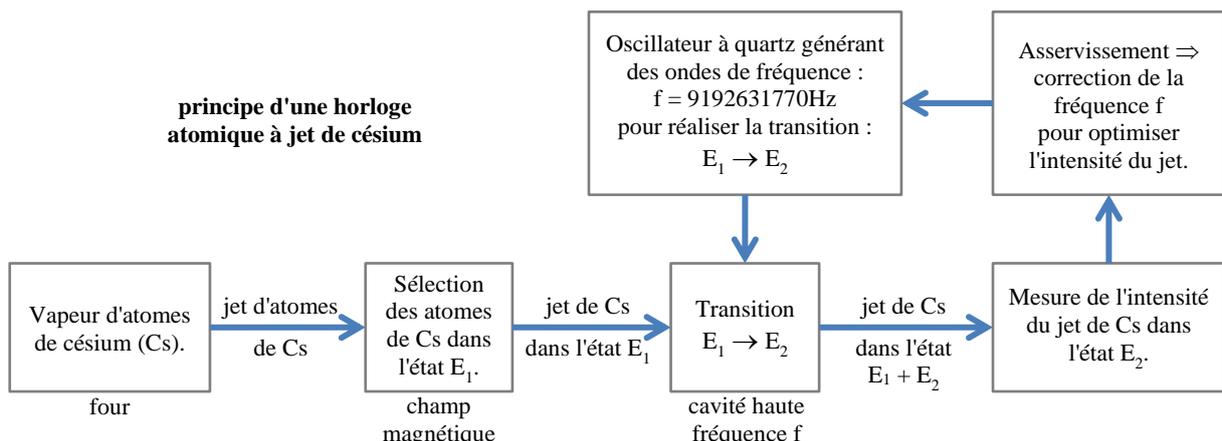
- avec :
- $\alpha \Rightarrow$ coefficient de dilatation thermique des métaux
 - L \Rightarrow la longueur en mètre (m) à la température θ considérée en kelvin (K) ou en degré Celsius ($^{\circ}C$)
 - $L_0 \Rightarrow$ la longueur initiale en mètre (m) à la température θ_0 de départ (K ou $^{\circ}C$)

- Variation de g avec l'altitude : diminue de $3.10^{-6}m.s^{-2}$ par mètre, en valeur relative, au voisinage du sol.
- Variation relative de g du fait de l'aplatissement de la Terre : 0,7 % entre l'équateur et les pôles.

► **Document 3 : Trois définitions de la seconde**

Avant 1956	Entre 1956 et 1967	Depuis 1967
La seconde est égale à 1/86400 du jour solaire terrestre moyen.	La seconde est égale à 1/31556925,9747 de l'année tropique, c'est-à-dire de la durée écoulée entre deux équinoxes de printemps.	La seconde est 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.

principe d'une horloge atomique à jet de césium



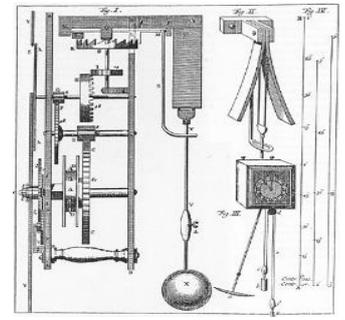
► Document 4 : La fin des étalons mécaniques et astronomiques

Jusque dans le courant du XX^{ème} siècle, les horloges les plus précises à usage scientifique utilisaient un pendule comme oscillateur. L'idée d'utiliser le balancement d'un objet pour mesurer et conserver le temps remonte à Galilée, vers 1580. La légende raconte qu'il utilisait les battements de son cœur pour étalonner les oscillations de ses pendules. Le physicien néerlandais Christian Huygens prendra la suite : il invente en 1657 un mécanisme de correction des légères variations de période avec l'amplitude. Son horloge présentait une dérive de 10s par jour. La meilleure horloge à balancier a été inventée par William Shortt dans les années 1920 et équipa très vite la plupart des observatoires astronomiques : elle était susceptible de donner l'heure avec une précision supérieure à 2 millisecondes par jour.

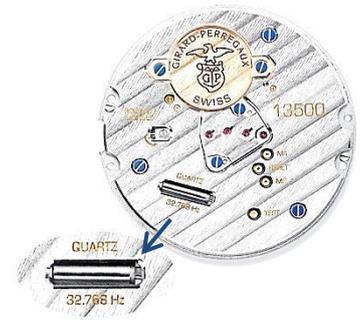
Les horloges de Shortt furent détrônées par les horloges à quartz dès les années 30. Ce matériau présente des propriétés piézoélectriques propices à son utilisation dans les garde-temps. Le principe des oscillateurs à quartz n'est pas plus compliqué que celui d'une cloche : quand on la heurte, une cloche sonne avec une note de musique précise, qui dépend de la forme, de la taille et du matériau qui la compose. Quand on comprime un cristal de quartz, une tension électrique apparaît entre ses faces. À l'inverse, si l'on soumet ses faces à une tension électrique, le cristal se contracte ou se dilate. Un cristal qui vibre à une certaine fréquence génère un signal électrique de même fréquence, signal que l'on peut rediriger sur lui pour le contraindre à osciller encore. La fréquence de vibration peut être ajustée par la taille du cristal. Dans les horloges ou les montres à quartz modernes, la fréquence la plus souvent retenue est de 32768Hz. Ce choix n'est pas quelconque : $32768 = 2^{15}$, ce qui fait qu'en divisant 15 fois cette fréquence par 2 par un circuit électronique, on obtient une fréquence d'une oscillation par seconde. La dérive des premières horloges à quartz étaient de l'ordre de 10^{-4} s par jour.

Le ralentissement séculaire de la rotation propre de la Terre en raison des marées lunaires implique que le jour diminue de 1,64ms par siècle actuellement. Les mouvements de l'atmosphère, ou encore le couplage noyau-manteau terrestres rendent encore plus délicate la construction d'une échelle de temps fondée sur la mécanique terrestre : la dernière en date, en 1956, basée sur la révolution annuelle de la Terre autour du Soleil (et non plus sur sa rotation propre), sera complexe à mettre en œuvre, et la naissance des horloges atomiques lui donnera rapidement le coup de grâce. La première horloge atomique à jet de césium fut réalisée en 1956, sa dérive n'était alors que de 10^{-5} s par jour. La précision passa à 10^{-16} s par jour en 2013.

D'après Tony JONES, "Combien dure une seconde ?" EDP Sciences (2003)



horloge de Huygens



intérieur d'une montre à quartz



horloge atomique

1. Qu'est-ce que la longitude d'un point sur Terre ? En quoi la possession d'une horloge adaptée et d'un moyen de connaître l'instant où le Soleil est au zénith permet-il de la déterminer ?
2. De quels paramètres dépend la période d'un pendule simple ? Peut-il constituer un étalon de temps satisfaisant ?
3. Les calculs suivants seront conduits avec 6 chiffres significatifs pour pouvoir mettre en évidence les faibles variations.
 - a. Calculer la longueur L_0 d'un pendule métallique de période $T_0 = 2,00$ s avec $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$.
 - b. Déterminer la longueur L de ce même pendule en bronze si la température augmente de 30°C .
 - c. En déduire la nouvelle période de ce pendule.
 - d. Quelle serait la dérive de la pendule pour un voyage de 30 jours compte-tenu de cette variation ?
4. Expliquer pourquoi les deux définitions astronomiques de la seconde ont été remplacées.
5. D'après la vidéo, quelle est la dérive actuelle des horloges atomiques ?
6. Expliquer pourquoi les systèmes GPS nécessitent des mesures de durées extrêmement précise, de l'ordre du millionième de seconde.
7. Relever les dérives des horloges mécaniques, à quartz et atomiques et les présenter sur la frise chronologique ci-dessous. En quatre siècles, combien d'ordres de grandeur ont-ils été gagnés en termes de précision ?

