

MESURE DU TEMPS ET DÉFINITION de la SECONDE

- En intro, regardez 2 min de la vidéo (plage entre 1,11 et 3,30 min) <https://lejournel.cnrs.fr/videos/les-nouveaux-maitres-du-temps>



- Puis lire le texte fourni ci-dessous et rechercher (SANS calculatrice) les 5 questions. (20 minutes maximum , sans regarder la correction car les questions sont INDÉPENDANTES)
- Travailler la correction fournie en dernière page. (2 à 10 min)
- Pas de devoir.

ANALYSE DOCUMENTAIRE : Définition de la seconde : la quête de la précision (sans calculatrice)

Évolution de la mesure de la seconde.

Les phénomènes astronomiques périodiques servent de référence à la mesure du jour et des années depuis la Préhistoire. Pour mesurer des durées plus petites, les dispositifs mécaniques perfectionnés à partir du XVII^e siècle utilisent des oscillateurs mécaniques :

- Des pendules pesants (balanciers) pour les horloges mécaniques.
- Des systèmes masse-ressort dans les montres mécaniques.
- Un cristal oscillant dans les montres à quartz. Le fonctionnement de l'horloge à quartz est simple : **une stimulation électrique engendre des vibrations mécaniques**, d'amplitude maximale selon des directions particulières (axes mécaniques), lesquelles sont la cause de charges électriques variables. On obtient ainsi un **oscillateur électrique dont la fréquence de vibration est propre au quartz** lui-même, soit 32 768 Hertz.

Les oscillateurs mécaniques sont soumis à la force de frottement responsable de la dissipation de leur énergie mécanique au cours du temps donc de la diminution de l'amplitude de leurs oscillations. Il faut donc **entretenir ces oscillations** par un apport d'énergie mécanique.

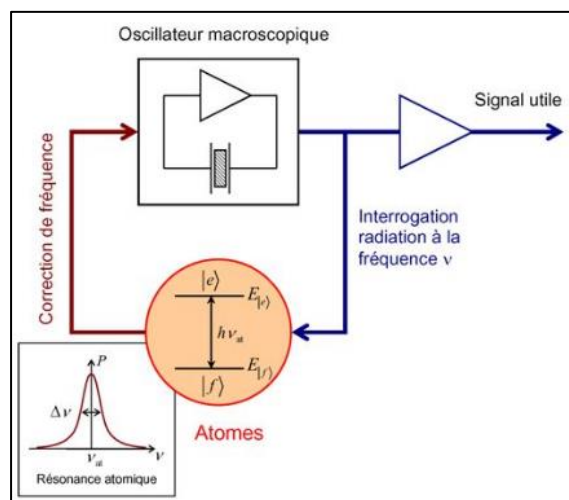
La variabilité des périodes d'oscillations en fonction des conditions atmosphériques, l'usure des mécanismes (en vieillissant, le quartz s'abîme et change progressivement de fréquence d'oscillation), rendent l'utilisation de tels dispositifs incompatibles avec un besoin de grande précision.

L'horloge atomique.

Depuis 1967, la définition du temps s'appuie sur **l'horloge atomique au césium 133**. Le temps atomique international est donné par la moyenne de 400 horloges atomiques au césium à travers le monde.

Une horloge atomique comporte un oscillateur à quartz dont la fréquence f est contrôlée par un dispositif de régulation qui repère et corrige en temps réel les fluctuations de la fréquence afin que celle-ci soit stable et la plus exacte possible. Ce dispositif d'asservissement s'appuie sur la fréquence (9 192 631 770 Hz) de la radiation correspondant à la transition entre deux états d'énergie E_1 et E_2 de l'isotope 133 du césium.

Sur des atomes de Cs à l'état E_1 confinés dans une cavité, des micro-ondes sont envoyées à une fréquence f' proche de $f = (E_2 - E_1) / h$. Les atomes de Cs passent à l'état E_2 . Le nombre d'atomes à l'état E_2 est compté, et on optimise la fréquence du micro onde pour avoir toujours le max d'atomes en E_2 . Cela est obtenu si f' vaut exactement f . Du coup **la fréquence de l'oscillateur à quartz est ainsi asservie à la fréquence de la transition atomique du Cs**.



Les atomes de césium sont tous identiques (un seul isotope) ; ils gardent les mêmes propriétés (ils ne s'usent pas !). L'énergie des photons qu'ils émettent lors de la transition est universelle et immuable. Ceci explique, en partie, l'évolution de la précision entre les meilleurs horloges à quartz (0,1 ms/jour) et les horloges atomiques au césium (10 ps/ jour)

L'horloge atomique au césium utilise une transition énergétique d'atomes en mouvement. L'effet Doppler est alors responsable d'une incertitude dans la mesure de la fréquence. Voilà pourquoi des recherches portent actuellement sur des horloges utilisant des atomes ou des ions piégés à une température très faible (quelques microKelvin). De telles horloges sont appelées « horloges optiques » car les fréquences des radiations de référence sont dans le domaine du visible et non dans les micro-ondes comme pour les horloges au césium. **L'incertitude sur la mesure du temps représente une fraction de la période de l'oscillateur**. Il en résulte que plus la période est petite et plus l'incertitude sur la mesure est faible. Les horloges optiques les plus performantes (à base de Mercure) atteignent, en 2012, une incertitude relative inférieure à 10^{-17} .

1. Surligner dans le texte « horloge atomique », 2 expressions qui expliquent en quoi le recours à une horloge « atomique » est plus performant qu'une horloge « mécanique ».
2. Rappeler la composition d'un atome de césium soit $^{133}_{55}\text{Cs}$
3. Montrer que le rayonnement du césium est bien dans le domaine des micro-ondes. ($10^{-3} \text{ m} < \lambda < 10^{-1} \text{ m}$)
4. Souligner dans le texte la précision d'une horloge au Cs.
En déduire un ordre de grandeur du temps (exprimé en siècles) au bout duquel l'erreur accumulée est de 1s.
5. Dans le dernier paragraphe, souligner les 2 améliorations introduites dans des horloges optiques.

Analyse documentaire. Réponses

1 – Une horloge « atomique » est plus performante qu'une horloge « mécanique » car il n'y a pas de « **variabilité des périodes d'oscillations** en fonction des conditions atmosphériques, l'usure des mécanismes » et le phénomène repose sur une « transition **universelle et immuable** »

2 – $^{133}_{55}\text{Cs}$ contient 55 électrons (atome est neutre), **133** nucléons dont 130-55 neutrons, et 55 protons.

3 – $f = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ soit environ 10^{10} Hz , d'où $\lambda = c / f \approx 3 \cdot 10^8 / 10^{10} = \mathbf{3 \cdot 10^{-2}\text{ m}}$.
 λ appartient bien aux micro ondes car $10^{-3}\text{ m} < \lambda < 10^{-1}\text{ m}$.

4 – La précision des horloges atomiques au césium est de **10 ps/ jour** soit donc $10 \times 10^{-12}\text{ s}$ par jour.

Donc il faut 10^{11} jour pour accumuler une seconde. Or 10^{11} jours =

$$1 \times 10^{11} \text{ jour} = \frac{1 \times 10^{11}}{365} \text{ an} \cong \frac{1 \times 10^{11}}{300} \text{ an} = \frac{1 \times 10^9}{3} \text{ an} = \frac{1 \times 10^7}{3} \text{ siècles} \cong 3 \times 10^6 \text{ siècles.}$$

donc grosso modo, 3 millions de siècles !

5 – Amélioration de l'horloge optique, car **fréquence plus grande** (donc meilleure précision), et **absence d'effet Doppler** car matière ultra-refroidie.