

La mesure du temps

I - Le temps : Notion difficile à percevoir, mais qui s'écoule de manière inéluctable...

- On sait **perdre** son temps...
- On essaie de **gagner** du temps...
- On peut aussi **tuer** le temps...
- Mais: le **toucher**, le **sentir**, le **voir**, le **goûter**, l'**entendre**....? Nos sens sont incapables de le percevoir!
- Pourtant, physiquement, nous savons qu'**il passe** et de manière **INELUCTABLE!**
- La seule façon de pouvoir se sentir un peu « maître du temps » est donc pour nous d'essayer de le **mesurer** avec précision...



II – Histoire de la mesure du temps

1) Des observations pour mesurer le temps:

- Rythme des jours, des saisons,
- Cycle de la lune, du soleil,
- Durée de certaines activités humaines...

« **Cuire le riz** » signifie
½ heure à Madagascar



2) Une mesure de plus en plus précise s'impose progressivement

Le développement de l'agriculture des sciences, la religion (etc....) sont autant d'activités qui ont imposé une évolution dans la précision de la mesure du temps.

3) Recherche d'intervalles de temps de plus en plus courts

- a) Première période : Au début un bâton permettait grâce à son ombre de déterminer le temps qui passe ; lui a succédé le sablier puis la clepsydre (mesure du temps de parole des orateurs grecs) puis le pendule de Galilée, de Foucault...
 - b) Deuxième période : A partir du XIV^{ème} siècle la minute va faire son apparition grâce à l'horloge : horloge mécanique, chronomètre, horloge à quartz et enfin horloge atomique.
 - c) Naissance du chronomètre :
- Ce sont les marins par nécessité de retrouver leur position, une fois perdus en mer qui sont à l'origine de l'évolution de la mesure du temps:
 - Pour connaître sa longitude en mer, il faut connaître l'heure à bord du bateau et l'heure au port ou à un endroit sur terre dont on connaît la longitude, au même instant. Comme la terre effectue 360° en 24H, chaque heure de différence entre le bateau et le port correspond à 15° de longitude vers l'Est ou vers l'ouest ; Soit, à une distance parcourue de 1669,858 km à l'équateur.
 - Pour connaître l'heure à bord, on se basait sur le soleil à midi.
 - Conserver l'heure du port sur le bateau, était chose difficile: le balancement des pendules, les mécanismes d'horloges étaient altérés par le roulis, l'humidité les changements de température et de pression...
 - Pour cela en 1714 le « longitude act » est voté par le parlement Britannique; Il promet une récompense à quiconque trouvera moyen de mesurer la longitude à ½ degrés près, créant ainsi le premier fonds de recherche scientifique de l'histoire!

1735: John Harrison, un horloger anglais, met au point le premier chronomètre!

Une copie du modèle H-4 fut testée par James Cook en 1772

Les chronomètres de Harrison furent considérés pendant longtemps comme les instruments de navigation les plus coûteux mais les plus indispensables!

Aujourd'hui, les besoins de la navigation, sur terre, dans les airs et dans l'espace, ont supplanté les chronomètres de Harrison au profit des montres à haute fréquence.

III – Evolution moderne : Le Quartz

1) Les outils: Oscillations et fréquence

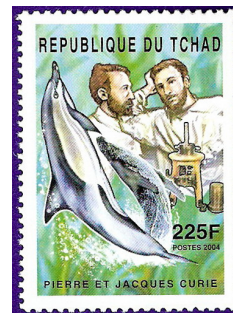
- Tout ce qui balance régulièrement (appelé oscillation) peut servir à mesurer le temps; Il suffit de connaître le nombre d'oscillations effectuées dans un intervalle de temps donné (jour, heure, minute ou seconde).

- Celui-ci porte le nom de « fréquence » des oscillations, se note f et s'exprime en Hz.
- (1Hz = 1 oscillation par seconde)

Exemples

On peut mesurer le temps:

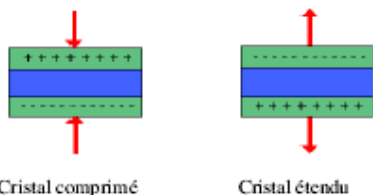
- En comptant les battements de son cœur si on connaît leur fréquence.
- En utilisant le soleil car il atteint son zénith 1 fois par jour ou 365,14 fois par an: soit avec une fréquence $f = 11,6 \mu\text{Hz}$...
- Toute fréquence stable est une horloge.



2) Utilisation de certains cristaux

Certains cristaux soumis à des contraintes (pressions, déformations) voient des charges s'accumuler sur leur surface, créant ainsi un champ électrique.

- 1 cristal de quartz comprimé (ou étendu) ... devient comme une pile avec un pôle + et un pôle -



- Inversement, ces mêmes cristaux, placés dans un champ électrique oscillant, voient leur forme se modifier et vont se mettre à vibrer.

- L'effet est amplifié et devient sensible seulement lorsque la fréquence des oscillations correspondent à celles du quartz. Il y a alors résonance entre l'excitateur et le quartz.

3) Principe de fonctionnement de l'horloge à quartz :

- Un oscillateur électrique crée un signal électrique de fréquence réglable qui agit sur le cristal de quartz.
 - Celui-ci va vibrer et émettre un signal électrique à son tour.
 - Ce signal va alimenter un circuit électrique de « régulation » qui va modifier la fréquence de l'oscillateur pour l'accorder sur celle du quartz.
 - Il y a donc résonance, et amplification des effets.
 - En général la résonance est obtenue pour $f = 32\,768\text{Hz}$
- Pour finir, un circuit intégré divise cette fréquence par deux, 15 fois. Ce qui donne une vibration par seconde!

4) Avantages et inconvénients:

- On peut espérer obtenir, avec les plus performantes, une dérive n'excédant pas **1 seconde tous les 3 000 ans** avec une horloge à quartz!
- Cependant, la fréquence de résonance d'un quartz dépend de la grandeur et de la forme du cristal...
- Or il est difficile de fabriquer des formes de cristaux absolument identiques...
- De plus les cristaux les plus petits fournissent les fréquences les plus élevées, nous sommes limités par notre capacité à produire des cristaux de petite taille...
- Enfin, les cristaux vieillissent mal, (contamination, changement de structure du cristal)

IV) Où l'atome s'en mêle...

1) L'IDEE est la suivante :

- Pour mesurer des intervalles de temps toujours plus petits, il faut utiliser le plus petit générateur de fréquence, c'est à dire l'**atome** !
- **Mais** quelle est la relation entre un atome et une **fréquence stable** ????

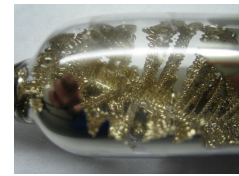
2) Des fréquences stables dans l'atome.

- Dans le chapitre « énergie et matière » nous avons vu que les atomes sont des « transformateurs » d'énergie:
- Ils peuvent absorber de l'énergie; Ils passent alors dans un état dit « état excité »
- Il ne peuvent pas garder cette énergie, mais la ré émettent sous forme de rayonnement électromagnétique: lumière visible ou invisible.
- L'énergie qu'il peut absorber et ensuite ré émettre, ne peut pas avoir n'importe quelle valeur. Elle doit permettre aux électrons de cet atome de transiter entre deux niveaux d'énergie: ces niveaux sont parfaitement définis, immuables.
- L'énergie est émise par l'atome sous forme de « photon » transportant la quantité élémentaire :

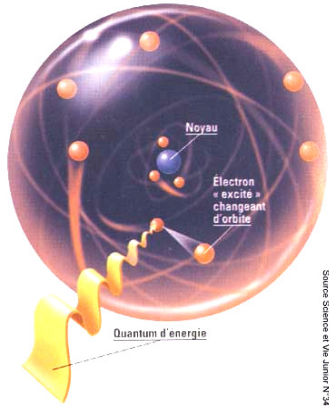
460 av. J.-C. - 371 av. J.-C. : « rien n'existe à part les atomes et le vide: le reste n'est qu'opinion » **Démocrite**

ET VOILÀ NOTRE FREQUENCE IDEALE!

Plus besoin de pendules, de rouages ou de tailler des cristaux ...



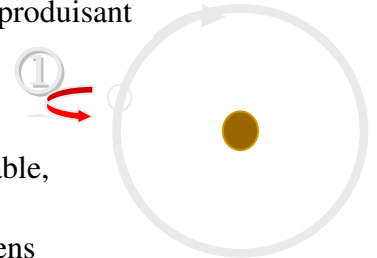
3) Comment construire la seconde parfaite



- Il faut choisir l'atome IDEAL.
- (La molécule d'ammoniaque NH₃ fut la première élue, C'est le Césium Cs **133** maintenant)
- Le césium naturel est constitué du seul isotope stable ¹³³Cs. Il contient 55 électrons, c'est le dernier qui nous intéresse. (Du latin cæsium « bleu-ciel » sa couleur de flamme.)

Intérêt du 55^{ème} électron: Celui-ci tourne autour du noyau produisant ainsi un champ magnétique ;

- Il tourne également sur lui-même, produisant alors un deuxième champ magnétique ;



- L'atome est dans son état fondamental, état le plus stable, de plus faible énergie E_a, lorsque les deux champs magnétiques ainsi créés sont de même direction et de sens opposés.

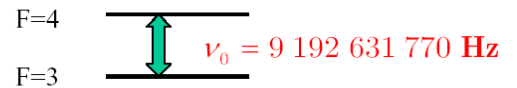
- Lorsque les deux champs magnétiques sont de même direction mais de même sens alors l'atome de césium est dans un état excité, moins stable que l'état fondamental, d'énergie E_b. Lorsque l'atome passe de l'état excité d'énergie E_b à l'état

fondamental, il émet une radiation électromagnétique de fréquence caractéristique :

$$f = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz} \quad \text{ou} \quad 9,192\,631\,770 \text{ GHz}$$

4) Définition de la seconde

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins F=4 et F=3 de l'état électronique fondamental du césium133;



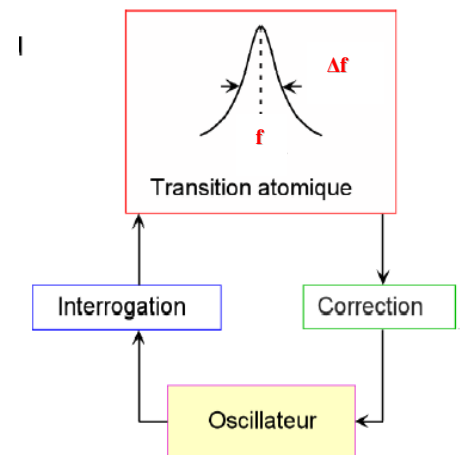
Caractère universel de cette transition

5) Principe de l'horloge atomique au césium

- Un oscillateur de fréquence réglable, f₀, donne le signal qui va permettre d'exciter les atomes de Césium du niveau fondamental au niveau E_b;
- Ce signal n'est efficace que si sa fréquence est proche de celle émise par l'atome lors de son retour à l'état fondamental.
- Il y a alors résonance.
- Ceci permet d'asservir l'oscillateur à la fréquence de la transition du Césium : il y a en quelque sorte « autocorrection »

Conclusion:

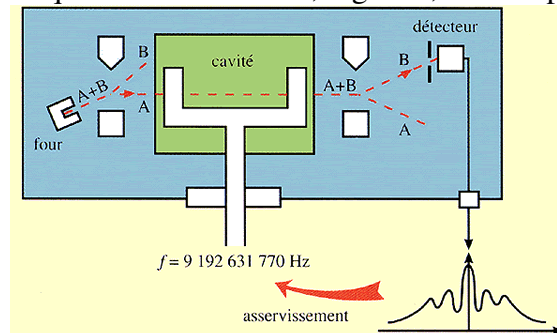
- Une horloge atomique est donc un oscillateur dont la fréquence est verrouillée sur celle d'une transition atomique, **universelle**.
- L'asservissement sera d'autant plus **précis** que la résonance est aiguë et que **Δf est petit**.



6) Fonctionnement

- Les atomes de Cs sortent d'un four ; Dans le faisceau il y a des deux sortes d'atomes A (état fondamental) et B (état excité);
- Des aimants trient ces atomes pour ne garder que les A;

- Ceux-ci pénètrent dans le tube où ils sont soumis à un rayonnement micro-onde de fréquence très proche de la fréquence de résonance, réglable, fournie par un oscillateur.



- Si la fréquence est très proche ou égale à la fréquence de résonance, un grand nombre d'atomes passeront dans l'état excité.
- À la sortie du tube un nouveau tri magnétique permet de détecter les atomes B qui vont permettre de contrôler et de corriger la fréquence de l'oscillateur. L'objectif est d'atteindre le maximum d'atomes B; la fréquence engendrée est alors extrêmement stable.

Le temps est ainsi devenu la grandeur mesurée avec la plus grande précision par les physiciens. On cherche pourtant encore à l'améliorer!

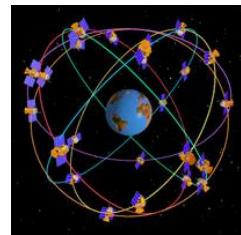
- Malgré la précision obtenue avec ce type d'horloge atomique, POURQUOI cherche-t-on toujours à améliorer la précision de la mesure du temps?

- C'est encore et toujours pour des raisons de « positionnement dans l'espace ».

V – Les derniers projets en cours d'amélioration ou de réalisation

1) Les systèmes GPS et GLONASS (Russe)

- BUT: Fournir à un utilisateur fixe ou mobile, sa position, sa vitesse et une information du Temps qu'il soit sur mer, sur Terre, dans les airs ou même dans l'espace.



- Le système est très similaire à celui utilisé pour la recherche de la longitude en mer.
- Chaque satellite transporte une horloge atomique (4 en fait, on n'est jamais trop prudent), l'utilisateur lui aussi possède son horloge.
- Le satellite envoie une onde radio à l'utilisateur le renseignant sur sa position et sur le moment auquel le message a été envoyé.
- Comme il est possible de calculer avec précision le mouvement des satellites, il est donc possible de déterminer la position et si nécessaire la vitesse de déplacement de l'utilisateur.
- Comme par le passé, la différence dans le Temps (celui du satellite et celui de l'utilisateur) est convertie en différence de position. Si l'on désire connaître les trois coordonnées (x ; y ; z , ou longitude, latitude et hauteur) de l'utilisateur, trois satellites au minimum sont nécessaires.

2) Précision du système:

- Ce système permet un positionnement précis à 22 mètres horizontalement et 27,7 mètres verticalement.
- Trains, avions, systèmes de distribution du courant électrique, téléphone, radio, télévision et bien d'autres applications fonctionnent grâce à la connaissance précise du Temps que leur fournissent les satellites GPS ou GLONASS.

3) L'horloge atomique PHARAO, développée par l'ENS

- Le CNES travaille actuellement le projet d'horloge atomique à atomes refroidis PHARAO. (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite)
- Il sera installé sur l'ISS à l'horizon 2014 dans le cadre du projet européen ACES.
- PHARAO associe la micropesanteur et des techniques de refroidissement d'atomes de césium par laser. Son exactitude et sa stabilité atteindront 10^{-16} secondes: elle ne perdra qu'une seconde toutes les 300 millions d'années.

4) Pourquoi refroidir les atomes et aller dans l'ISS?

- La mesure de la fréquence de la transition des atomes de Cs est d'autant plus précise que la radiation émise est fine. La vitesse des atomes de Cs limite cette finesse.
- La mesure le temps est donc d'autant plus précise que leur vitesse est lente.
- Par ailleurs, la vitesse des atomes est influencée par la pesanteur. Pharaon s'affranchit de cette contrainte en étant placée en orbite : les atomes sont ainsi ralentis jusqu'à la vitesse de l'escargot: 7 mm/s.
- Une horloge d'une telle précision servira entre autres à vérifier certains principes de la théorie de la relativité générale avec une précision jamais atteinte.

- Grâce à Pharaon, les chercheurs espèrent par exemple pouvoir observer d'infimes variations des constantes physiques, telles que la constante de structure fine des atomes, qui signaleraient une faille dans la cuirasse de la relativité générale.
- A la clé s'ouvre la perspective de donner naissance à une seule et même théorie qui permettrait de réconcilier les descriptions de l'infiniment grand, ce que fait très bien la relativité générale, et de l'infiniment petit, où c'est la physique quantique qui prévaut.

Applications

- Positionnement (système GPS), navigation
- Géodésie
- Interférométrie à longue base
- Synchronisation d'horloges éloignées
- Tests de théories fondamentales :
 - Déplacement gravitationnel de la fréquence d'une horloge : ralentissement du temps avec l'accroissement de la vitesse;
 - Variation dans le temps des constantes fondamentales...

VI – CONCLUSION

Etonnés par cette course à la précision concernant la mesure du temps, surpris de constater comment l'état microscopique de la matière nous vient en aide et conscients des enjeux qui nous poussent à améliorer encore cette précision qui en est à 1 seconde pour 300 millions d'années, allons nous continuer à « tuer » ou à « perdre » notre temps ?...

