

LP-29-Mesure du temps. Exemple de dispositifs.

Maud Viallet & Guillaume Deplus

24 mars 2022

Niveau

Bibliographie

- ⚡ Histoire de la mesure du temps
- ⚡ Composition de physique - Epreuve A, 2020, partie I
- ⚡ La physique par les objets du quotidien, Cédric Ray et Jean-Claude Poizat, *p. 23*
- ⚡ Fundamentals of piezoelectric sensorics, Jan Tichy, Jiri Erhart, *p. 55-56*
- ⚡ Thermodynamique, Diu, *p. 95-96*
- ⚡ Quelques info sur le quartz (propriétés piézo, schéma électrique équivalents, ODG, , boucles de rétro-action, autres exemples d'application du quartz.
- ⚡ Différents types d'horloges (pour la culture ?)

Pré-requis

- Mécanique du point
- Premier et Seconde principe de la thermodynamique
- Mécanique des milieux continus
- Milieux diélectriques

Table des matières

1	Horloge mécanique	2
1.1	Système et mise en équation	2
1.2	Précision de la seconde	2
2	Horloge à quartz	3
2.1	Contexte et définition	5
2.2	Approche thermodynamique	6
2.3	Équations constitutives	6
2.4	Précision de la seconde	7
3	L'horloge atomique	7
4	Questions	9
5	Commentaires	10

Introduction

La mesure du temps repose sur la mesure d'une période d'un phénomène périodique (rotation de la Terre, balancier, etc). Pour mesurer le temps, il est donc nécessaire de disposer d'un système qui reproduit un phénomène de manière périodique, avec une grande précision. C'est ce qu'on appelle un oscillateur : il est la base de tout système de mesure du temps.

La mesure c'est autant important dans la vie de tous les jours, que pour le domaine de la science. On souhaite être capable de mesurer très précisément un intervalle de temps à l'aide d'un étalon que l'on connaît parfaitement.

On va donc étudier des systèmes capables de d'osciller à une fréquence fixe, connue : ça nous permet de faire un chronomètre / définir la seconde. Une **horloge** est une machine capable d'entretenir un phénomène périodique, de compter et d'additionner ses périodes pour donner l'heure. C'est ainsi que l'on a défini l'étalon comme étant la seconde. La définition de la seconde a quant à elle évolué au cours des avancées technologiques. On va parcourir dans cette leçon un certain nombre de dispositifs qui ont servi à définir la seconde au cours de l'histoire.

SPOIL : (cf. wikipédia) La définition de la seconde, l'unité de temps dans le Système international, a été établie selon les connaissances et les possibilités techniques de chaque époque depuis la première Conférence générale des poids et mesures en 1889.

Elle a d'abord été définie comme **la fraction 1/86400 du jour solaire terrestre moyen**. L'échelle de temps associée est le temps universel TU. En 1956, pour tenir compte des imperfections de la rotation de la Terre qui ralentit notamment à cause des marées, elle a été basée sur **la révolution de la Terre autour du Soleil** et définie comme la fraction 1/31 556 925,974 7 de l'année tropique. C'est la seconde du temps des éphémérides TE. Depuis la 13e Conférence générale des poids et mesures, la seconde n'est plus définie par rapport à l'année, mais par rapport à une propriété de la matière ; cette unité de base du Système international a été définie en 1967 dans les termes suivants : « La seconde, symbole s, est l'unité du temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, $\Delta\nu_{Cs}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz.

1 Horloge mécanique

1.1 Système et mise en équation

On considère un pendule faiblement amorti dans le cadre des petites oscillations. Donc par application du principe fondamental de la dynamique, on obtient l'équation sur l'angle que forme le pendule avec l'horizontale θ :

$$ml^2\ddot{\theta} = -ghl \sin \theta - \alpha l \dot{\theta} \quad (1)$$

qui se met sous la forme pour des petites oscillations :

$$\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = 0 \quad (2)$$

où on a défini $\omega_0 \equiv \sqrt{g/l}$. Dans le cadre d'un faible amortissement, avec une condition initiale de vitesse nulle, on a :

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-t/\tau} \cos \Omega t \quad (3)$$

avec

$$\frac{1}{Q} = \frac{\omega_0}{2Q}$$

et

$$\Omega \equiv \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$$

Les oscillations étant amorties, un système de masse est là pour compenser la perte d'énergie mais on ne détaille pas le fonctionnement. La mise en équation met en évidence l'existence d'un facteur de qualité. Si on trace le diagramme de Bode en fonction du facteur de qualité (cf. FIGURE1). Plus le facteur de qualité est grand plus la réponse du système sera élevée pour une excitation à la pulsation propre. Cela signifie qu'en détectant l'amplitude de la réponse on peut facilement repérer si le système n'oscille plus à la pulsation propre.

1.2 Précision de la seconde

On a une incertitude sur la valeur de la longueur du pendule que l'on souhaite osciller à 1Hz qui donne un décalage de 24min par jour.

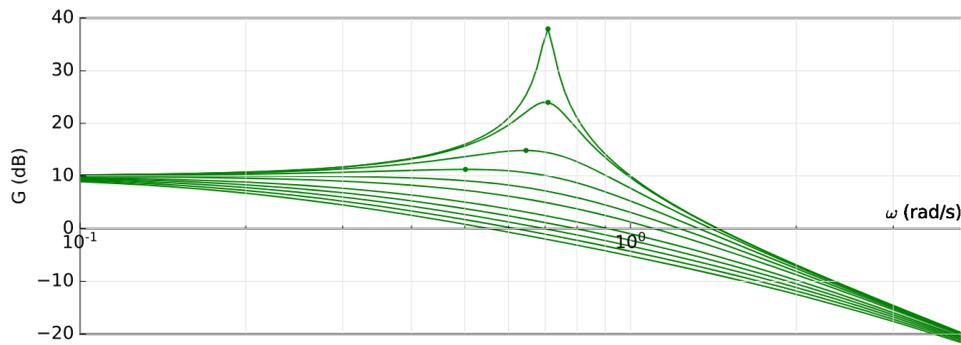


FIGURE 1 – Diagramme de Bode du second ordre pour différents facteurs de qualité.

Transition

Ce système a plein de défauts, puisqu'il dépend de la température (dilatation de la tige), de la pression (faible influence), de la localisation sur le globe ($g_{pole} = 9.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $g_{equateur} = 9.78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $g_{paris} = 9.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

2 Horloge à quartz

Le quartz : composition et modélisation (pas à présenter dans la leçon)

Histoire Pierre et Jacques Curie se passionnent pour la cristallographie. En 1880, ils montrent qu'un cristal de quartz soumis à une pression mécanique présente une différence de potentiel électrique entre ses faces. Pierre et Marie Curie parviennent qq années plus tard à l'aide de l'effet piézoélectrique à découvrir deux nouveaux atomes radioactifs : le polonium et le radium. Il existe toute une classe de matériaux piézoélectriques. Jacques et Pierre Curie ont découvert en 1880 l'effet piézoélectrique. Cet effet est présent dans des matériaux cristallins ne possédant pas de centre de symétrie. Il se traduit par **la capacité de certains matériaux à se polariser et à faire apparaître des charges électriques de surface suite à une contrainte mécanique** qui les déforme (effet direct). La déformation résultant de l'application d'un potentiel électrique est appelée l'effet inverse.

La première horloge à quartz fut mise au point dans les laboratoires Bell aux États unis en 1927. Elle faisait la taille d'une armoire.

Le quartz est composé de silice SiO_2 qui est une matière minérale extrêmement répandue dans la nature. C'est un matériau très dur et qui sera donc difficile à travailler, ceci expliquant en partie le prix à payer pour un quartz fait "sur mesure". **Un peu de cristallographie** : Le réseau de bravais correspondant est un réseau hexagonal comme on peut le voir FIGURE 2. Cependant cette représentation ne permet pas de rendre compte de la formule chimique du cristal qui est deux oxygène pour un atome de silice. Pour cela, il faut savoir que la silice est disposé selon une maille cubique à face centrée (CFC) dont la moitié des sites tétraédriques est occupés par une molécules de silice (cf. maille de diamant ou cf. maille de la glace.). Chaque atome de silicium occupant un site tétraédrique est en réalité en intération avec 4 atomes d'oxygène. On vérifie rapidement que :

- la population des atomes de silicium vérifie : $\underbrace{6 \times 1/2}_{\text{Atomes sur les face}} + \underbrace{8 \times 1/8}_{\text{Atomes sur les sommets}} + \underbrace{4}_{\text{Atomes dans les sites tétraédriques}} = 8$ atomes par maille
- la population des atomes d'oxygène vérifie : $\underbrace{4}_{\text{sites tétraédriques}} \times 4 = 16$ atomes par maille

Pourquoi le quartz ? Le quartz notamment présente une combinaison unique de propriétés remarquables :

- il est piézoélectrique ;
- on peut trouver des orientations cristallographiques qui minimisent la dilatation thermique ;
- il a de très faibles pertes mécaniques, ou en d'autres termes un excellent facteur de qualité mécanique ;
- il est très stable (en température, pression, etc.). Il a également une très faible solubilité dans la plupart des solvants dans des conditions ordinaires, à l'exception des solvants fluorés ;
- il est facile à usiner. Le quartz est dur, mais peu cassant ;

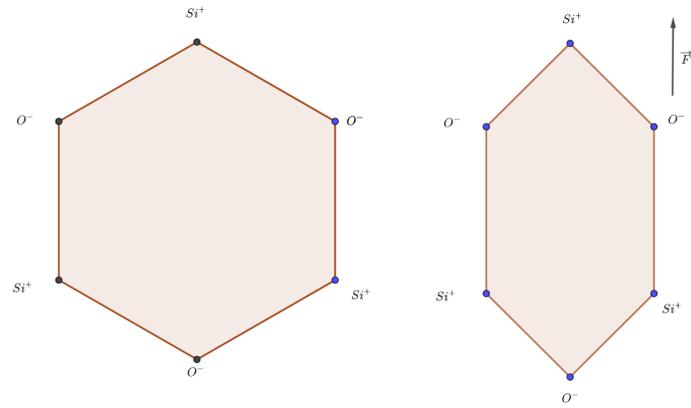


FIGURE 2 – Déformation du cristal sous l'effet d'un champ

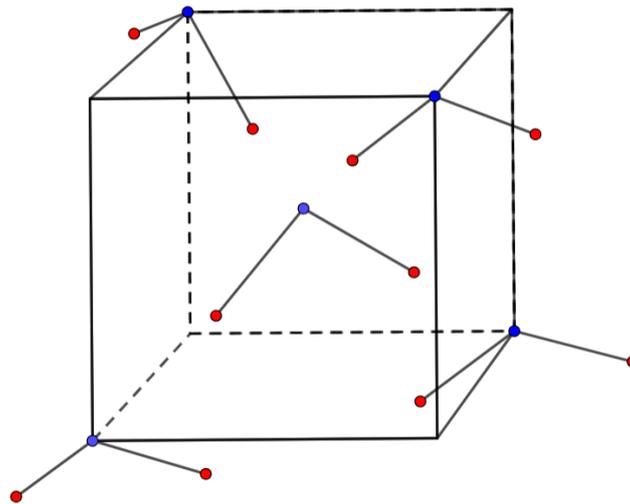


FIGURE 3 – Schéma d'un site tétraédrique

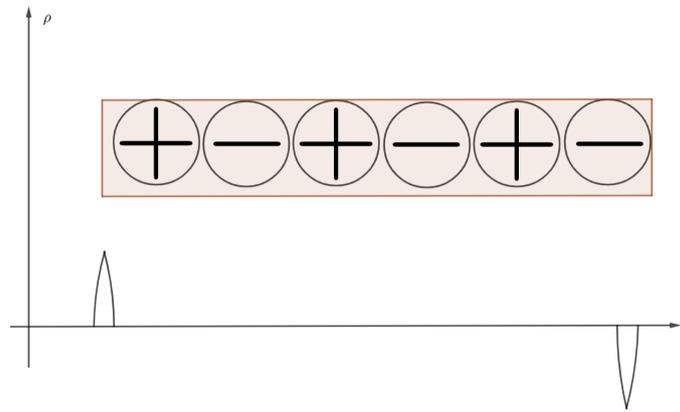


FIGURE 4 – Schéma : apparition des charges surfaciques à l'échelle macroscopique

- il est facilement intégrable dans des dispositifs de micro- ou nanoélectronique ;
- il est naturellement abondant, et peut être fabriqué à un coût modeste avec une très bonne qualité. Parmi les monocristaux de synthèse, le quartz arrive second en quantité produite (3 000 tonnes par an en 2000), derrière le silicium.

Vulgarisation de l'effet piézoélectrique Le cristal de quartz est composé de SiO_2 . Sa maille cristalline est hexagonale ; les atomes sont placés aux sommets et aux centres des faces supérieure et inférieure. Au repos les barycentres positif négatif sont confondus. Lorsque l'on impose une pression la maille se déforme pour adopter une forme plus allongée. Cette déformation s'accompagne de l'apparition d'un moment dipolaire (les deux barycentres ne sont plus confondus). Les champs électriques de chaque hexagonale s'ajoutent. L'oscillateur ici est un cristal de quartz en vibration. L'application d'une brève différence de potentiel au cristal de quartz provoque une vibration du cristal (par effet piézoélectrique inverse) pendant une certaine durée, les oscillations s'atténuant ensuite progressivement (on peut faire l'analogie avec le diapason qui vibre à 440Hz après avoir été heurté). Les vibrations du quartz engendrent alors une oscillation de la tension entre les faces du cristal. Les oscillations électriques sont amplifiées par un circuit intégré, puis réappliquées sur le quartz afin d'entretenir les oscillations : oscillation qui ont lieu à la pulsation propre du quartz. On a un phénomène de résonance. Dans la plupart des montres modernes, le cristal de quartz sont taillés de telle sorte que la fréquence de résonance soit de l'ordre de 32kHz. Cette fréquence propre est définie avec une très grande précision, c'est pour cela que le quartz s'est imposé dans la majorité des montres.

Éléments de la montre à quartz ↗ La physique du quotidien, p.23

- le cristal de quartz : taillé de telle sorte à vibrer à la bonne pulsation propre, enveloppé d'un film d'or pour lui appliquer la tension, protégé par un film d'aluminium
- la pile : elle déclenche et entretient la vibration du quartz
- le circuit intégré : il compte les oscillations électriques en provenance du quartz, il divise ce nombre de signaux en fréquence adapté au système d'affichage.
- l'affichage : cristaux liquide qui contrôle la tension nécessaire pour afficher les chiffres ou l'impulsion électrique est convertie en un mouvement mécanique qui fait tourner l'aiguille des secondes, laquelle est reliée pour entraîner celle des heures.

2.1 Contexte et définition

La première Horloge à quartz a vu le jour en 1927 aux États-Unis. On va étudier et mettre en évidence en quoi on peut assimiler le quartz à un oscillateur et comment il permet de définir la seconde. On va essayer de comprendre qualitativement en quoi la structure du quartz est intéressante. À l'aide de la FIGURE 2, on se rend compte que le barycentre positif et négatif n'est plus confondu lorsque l'on applique une force \vec{F} sur le cristal. De là, on fait apparaître un moment dipolaire entre les deux barycentres. On peut montrer à l'échelle macro également qu'on a une charge surfacique qui apparaît sur les faces extérieures telle que cela est fait sur la FIGURE 4. Cela implique l'existence de charges de surface ($\sigma = \vec{P} \cdot \vec{n}$). On note alors pour la suite la charge surfacique $Q_s = \frac{Q}{S}$. C'est ainsi que l'on peut définir l'**effet piézoélectrique** comme la capacité d'un matériau à se polariser sous l'effet d'une contrainte.

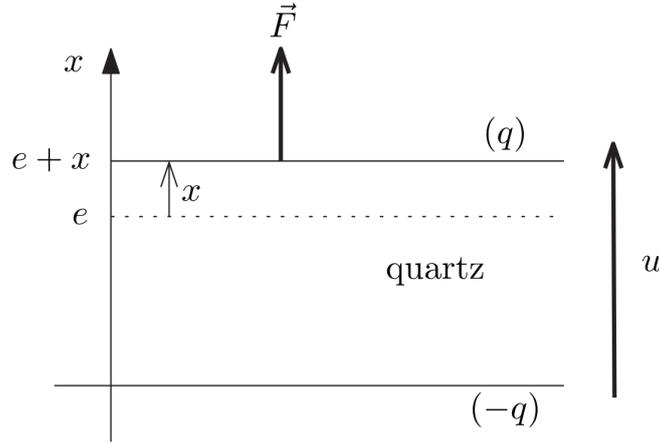


FIGURE 5 – Schéma du condensateur en quartz

2.2 Approche thermodynamique

⚡ thermo

Dans une approche thermodynamique, la piézoélectricité est un cas spécifique de phénomène de couplage : le couplage entre les phénomènes élastiques et diélectriques d'un dispositif. On considère un barreau de Quartz enserré de deux plaques d'or (supposé **conducteur parfait**) sur sa grande surface ($\sqrt{S} \gg e$ l'épaisseur). On considère que le quartz est un **Diélectrique Linéaire Homogène Isotrope (DLHI) élastique**. Par application des deux principes de la thermodynamique pour une **transformation réversible**, l'expression de la variation infinitésimale d'énergie interne volumique u s'écrit :

$$du = \delta q + \delta w = Tds + \underbrace{E_k dD_k}_{\text{Travail électrique volumique}} + \underbrace{\sigma_{ij} d\xi_{ij}}_{\text{travail volumique de la contrainte}} \quad (4)$$

Par transformée de Legendre, puisque nos paramètres de contrôle sont la température, le champ électrique et la contrainte appliquée :

$$dg = -sdT - D_k dE_k - \xi_{ij} d\sigma_{ij} \quad (5)$$

L'égalité des dérivées croisées fournit :

$$\underbrace{\frac{\partial \xi_{ij}}{\partial E_k}}_{\text{Effet piézoélectrique}} = \underbrace{\frac{\partial D_k}{\partial \sigma_{ij}}}_{\text{Effet piézo inverse}} \equiv d_{ijk} \quad (6)$$

Cette relation rend parfaitement compte du couplage électromécanique qui existe au sein du matériau piézoélectrique.

2.3 Équations constitutives

⚡ Composition de physique 2020 - Première partie

En l'absence de champ électrique, on applique une contrainte selon \vec{e}_x , ce qui donne pour le déplacement électrique :

$$\vec{D}_{\text{piézo}} = d\sigma \vec{e}_x = dY \frac{x}{e} \vec{e}_x \quad (7)$$

où on a Y le module d'Young du matériau. On pose ici $dY = \epsilon\alpha$ pour des soucis de simplicité pour la suite. On peut remarquer ici que α a la dimension d'un champ électrique, ce qui sera important pour la suite. Ce champ s'identifie ici à la polarisation piézoélectrique puisque le champ électrique est supposé nul. Par ajout d'un champ électrique supplémentaire, le déplacement électrique total s'écrit :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (8)$$

avec $\vec{P} = \vec{P}_{\text{piézo}} + \epsilon_0 \chi \vec{E}$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \chi \vec{E} + \frac{\epsilon\alpha x}{e} \vec{u}_x + \epsilon_0 \vec{E} \quad (9)$$

Pour obtenir notre première équation constitutive du quartz, on applique les relations de passage entre l'or et le quartz. On obtient finalement :

$$\frac{q}{C} + \alpha x = u \quad (10)$$

où u est la tension aux bornes du système, et C la capacité d'un condensateur qui s'écrit $C = \epsilon S/e$. La deuxième équation constitutive s'écrit d'autre part :

$$\underbrace{m}_{\text{masse effective}} \ddot{x} = \underbrace{-kx}_{\text{chaîne d'atome}} \underbrace{-\delta\dot{x}}_{\text{frottements}} \underbrace{-\alpha q}_{\text{force d'un champ électrique}} \quad (11)$$

avec un terme de frottement, la force d'un champ électrique et un terme de rappel élastique. On retrouve alors une équation sous la même forme que celle vue précédemment :

$$\ddot{v} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{-C\alpha}{m} \dot{u} \quad (12)$$

avec $\frac{\omega_0}{Q} = \frac{\delta}{m}$ et $\omega_0^2 = \frac{k-C\alpha^2}{m}$. On reconnaît l'équation d'un système oscillant qui possède une pulsation de résonance à ω_0 .

2.4 Précision de la seconde

On oscille globalement à $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$. Dans le cas des montres à quartz, ce dernier est taillé de sorte à avoir une pulsation de résonance égale à 32 768 Hz. On se rend compte que $f_0 = 2^{15}$ Hz, ce qui signifie quand divisant f_0 par 2^{15} on obtient une seconde. Cependant, il faut souligner qu'un tel système possède un un facteur de qualité qui définit une largeur de bande de pulsation c'est à dire une plage de fréquence pour laquelle la résonance a lieu (même si elle n'est pas optimale). La largeur spectrale définit par $\Delta f = \frac{f_0}{Q}$ avec Q de l'ordre de 22×10^3 est de l'ordre de 8 Hz. On retrouve ici l'importance du facteur de qualité dans l'exactitude de l'oscillation à la fréquence de résonance. On peut estimer l'erreur ϵ qui s'accumule.

$$\epsilon = \frac{1}{f_{ref}} - \frac{1}{f} \quad (13)$$

telles que $f = \frac{f_0 + \Delta f}{2}$. Dans ces conditions, on obtient $\epsilon = 6 \times 10^{-4}$ s. Dans l'horloge retard d'une seconde au bout de 28 min soit 48 secondes en une journée. En réalité, c'est même beaucoup mieux puisque on remarque un décalage de quelques secondes par mois seulement grâce à une boucle de rétro-action qui adapte l'excitation du quartz en fonction de sa dérivé par rapport à f_0 .

3 L'horloge atomique

Histoire ↗ [Qq infos ici](#). L'idée d'utiliser des transitions atomiques pour mesurer le temps a été suggérée par Lord Kelvin en 1879. [2] La résonance magnétique, développée dans les années 1930 par Isidor Rabi, est devenue la méthode pratique pour ce faire. En 1945, Rabi a d'abord suggéré publiquement que la résonance magnétique de faisceau atomique pourrait être utilisée comme base d'une horloge. La première horloge atomique était un dispositif de ligne d'absorption d'ammoniac à 23870,1 MHz construit en 1949 au US National Bureau of Standards (NBS, maintenant NIST). Elle était moins précise que les horloges à quartz existantes, mais servait à démontrer le concept.

À la fin des années 90, quatre facteurs ont contribué aux progrès majeurs des horloges :

- Refroidissement laser et piégeage des atomes
- Cavités Fabry – Pérot dites de haute finesse pour des lignes laser étroites
- Spectroscopie laser de précision
- Comptage pratique des fréquences optiques à l'aide de peignes optiques

[Thèse sur l'horloge atomique. p.5](#) (ce qui suit sont des extraits du début de la thèse)

Dans une horloge à balancier, le phénomène périodique est le mouvement du pendule et le compteur est un système d'engrenage relié au cadran où la position de la trotteuse est incrémentée d'un pas chaque seconde. Lorsque cette horloge se dérègle, le propriétaire de l'horloge va comparer l'heure de son horloge à une référence fiable (par exemple l'horloge parlante) et peut donc remettre sa pendule à l'heure. Une horloge atomique est une horloge dont le phénomène périodique est une oscillation électromagnétique (EM) et dont la remise à l'heure est réalisée continuellement par comparaison avec une référence ultra-stable : l'atome. Le fait de pouvoir mesurer cette fréquence **immuable** dans un atome particulier offre à la science une mesure universelle et normalisée du temps.

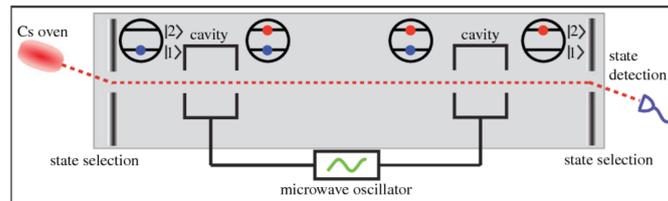


FIGURE 6 – Schéma simplifié d'une horloge atomique à déflexion magnétique

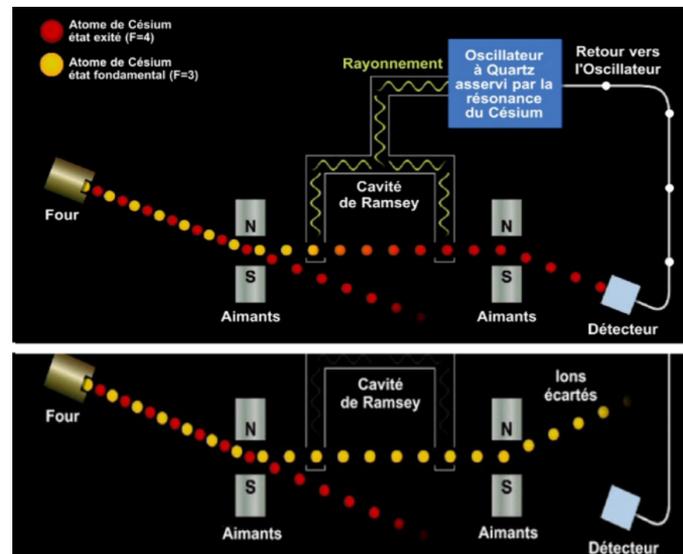


FIGURE 7 – Schéma simplifié d'une horloge atomique à déflexion magnétique 2 p.19-21

Fonctionnement générale Le principe de fonctionnement d'une horloge atomique repose sur l'asservissement de la fréquence d'un oscillateur sur une fréquence de référence absolue correspondant à la fréquence de transition entre deux états quantiques d'un atome, d'un ion ou d'une molécule. Le signal utile de l'horloge est généré par un oscillateur dont le type dépend de la gamme de fréquence considérée. Afin de comparer la fréquence f_0 de l'oscillateur à la fréquence de référence atomique f_{at} , une partie de ce signal est prélevée. Une synthèse de fréquence permet d'adapter la fréquence de l'oscillateur au domaine de fréquence de la référence atomique en générant un signal d'interrogation de fréquence ν_{int} proche de f_{at} . Cette synthèse est aussi utilisée pour contrôler finement les caractéristiques du signal qui va interagir avec les atomes : amplitude, ajout d'un décalage de fréquence, modulation d'amplitude et/ou de fréquence,...

En 1967 la seconde a été fixée sur "la durée de 9 192 631 770 périodes de la transition correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental du césium 133", lors de la Conférence Générale des Poids et Mesures.

Supposons que nous disposons d'un oscillateur local capable d'émettre un signal à la fréquence f_0 proche de la fréquence ν_{at} d'une transition atomique entre deux états $|1\rangle$ et $|2\rangle$. La stabilisation de l'oscillateur local se fait alors en trois étapes :

1. **PRÉPARATION DES ATOMES** : les atomes sont tous placés dans l'un des deux niveaux $|1\rangle$ ou $|2\rangle$, par exemple par pompage optique.
2. **INTERROGATION MICRO-ONDE** : Cette étape correspond au test de la fréquence ν_0 . En pratique, l'atome est excité à l'aide du signal issu de l'oscillateur local. Selon la différence de fréquence $\nu_0 - \nu_{at}$, les atomes transitent plus ou moins d'un niveau vers l'autre.
3. **DÉTECTION DE LA RÉSONANCE** : la quantité d'atome ayant transité est mesurée. Ceci permet de déduire le décalage de fréquence $\nu_0 - \nu_{at}$.
4. **CORRECTION** : la différence de fréquence déduite de l'étape précédente permet de venir corriger la fréquence de l'oscillateur local de $\nu_0 - \nu_{at}$, de sorte que sa fréquence reste égale à la fréquence atomique. Ce cycle est réalisé en permanence de manière à stabiliser continuellement la fréquence de l'oscillateur.

Fonctionnement : horloge atomique au jet de Césium ↗ Qq infos p.17

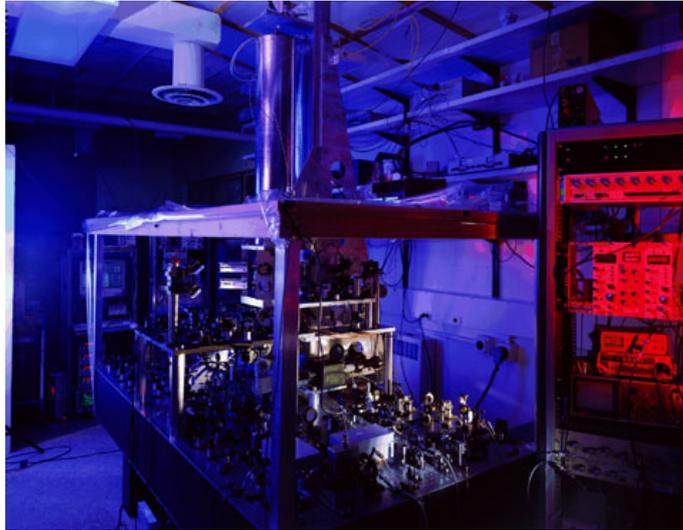


FIGURE 8 – Horloge atomique à fontaine d'atomes de césium étalon primaire de temps et de fréquence des États-Unis. En 2005, son incertitude était affichée à 5.10^{-16} s.s-1

Calculs \rightsquigarrow LP-43-Systèmes à deux niveaux et Calculs

4 Questions

- Définir le temps, la seconde. Est-ce qu'on peut donner différentes définitions que l'on a pu lui donner. Pour l'horloge à quartz : c'est 2^{15} fois sa période. On l'a redéfinie à l'aide de l'horloge atomique
- Dans les temps anciens? On utilisait les cycles lunaires, de la terre. Peut-être une clepsydre?
- Comment définit-on la seconde maintenant?
- mesure du temps à l'aide de phénomènes non périodiques? Sablier - Clepsydre. Autres exemples? Systèmes qui ont un temps de vie connu : genre la demi vie d'un atome
- Différence entre une clepsydre et un sablier? Pour un milieu granulaire, la vitesse à laquelle le "fluide" s'écoule est indépendante de la hauteur (c'est pas le
- rôle de la masse m dans l'équation? On veut une grande masse pour avoir un grand facteur de qualité
- Est-ce que c'est ce système que l'on utilise dans une comptoise? Oui globalement : faire un schéma qui explique qu'on a une ancre. De plus, on a un pendule pesant et pas un pendule simple comme indiqué ici. Ainsi, on utilisera
- On a supposé que l'oscillation était sinusoïdale : effet de la chute sur cette sinusoidalité? On peut peut-être faire un schéma de l'allure.
- Problème dans l'AN du décalage
- Que dire de l'ODG sur le décalage de 14 minutes par jour : c'est clairement surestimé. Avantage de quelque chose de pesant, bien
- Première horloge à quartz, qu'en dire de plus? Produite par Dell.
- qu'est-ce qui prenait autant de place? Les diviseurs de fréquence?
- Comment varie l'électronégativité dans le tableau périodique
- Sens physique des hypothèses faites sur le quartz? DLHI : on regarde la relation entre D et E. homogène : indépendant de la position. Linéaire : Epsilon est une matrice pas un tenseur, isotrope : epsilon est un scalaire. Élastique : on associe un module d'young, déformation faibles.
- De quelles propriétés a-t-on besoin dans un conducteur parfait? Champ électrique nul
- transformations réversibles? non car il y a des frottements.

- Comment compense-t-on les frottements. On compense les frottement en adjoignant un système à résistance électrique négative.
- Dans les premiers et second principe, une petite erreur
- hypothèses d'application du théorème des dérivées croisées? la fonction doit être de classe C2. Exemple de fonction qui ne l'est pas? Les transitions de phase
- ordre de grandeur dans les quartz de la déformation de ce qu'on considère?
- particularité dans ses fréquences de résonance? Pourquoi se sert-on d'un diapason? Il a un fondamental très piqué, 2 3 fond nuls, 4 fond quasi nul.
- De quoi dépend $\omega - 0$?
- Comment fonctionne une horloge atomique? On utilise du césium 133 et ses transitions énergétiques entre deux niveau hyperfins. Ce qui est intéressant, c'est que l'on asservit une horloge à quartz avec le césium.
- Comment fabrique-t-on une horloge dans un ordinateur. Comment fait-on pour fabriquer des oscillations de l'ordre du GHz. Ce sont des horloges à quartz couplées à une boucle à verouillage de phase
- Pour adapter cette leçon pour le lycée? La première partie Adopter une approche qualitative, pour la deuxième partie : expliquer dans les grandes lignes ce qu'il se passe.
- On a parlé de mesure de temps sur des intervalles de temps petits. Comment fait-on pour mesurer des temps sur des échelles beaucoup plus grandes? On peut se servir de temps de demi vie? Genre datation au carbone 14.
-

5 Commentaires

- Leçon globalement bien menée
- passer moins de temps sur l'horloge à quartz et sa modélisation : creuser un petit peu sur l'horloge simple.
- Insister un peu plus sur le facteur de qualité. Introduire les nouvelles variables. Les schémas sur slides c'est sympa.
- Ici, "définir la seconde" : donner un fil rouge clair.
- Peut-être parler dans une vraie partie de l'horloge à césium.
- On finit sur l'horloge atomique. Mais on peut aussi donner la définition de la seconde comme une fraction de journée : et ensuite on fait un détail des évolutions. Plan historique cela dit...
- On a dit sommation d'Einstein ici, peut-être que mettre la somme est plus pertinent.
- On fait pas vraiment d'où sort la fréquence f_0 . Les quartz peuvent osciller à différentes fréquences en fonction de la manière avec laquelle ils ont été taillés.
- conclusion trop rushée.