

Partie 1 : Une simple histoire de temps...

Chapitre 1

Nécessité de la notion de temps en physique et en chimie

I Description temporelle des systèmes

1) Mise en évidence, description d'un système

Un système physique et/ou chimique défini, grâce à une enceinte, par son extérieur et son intérieur (voir chapitre évolution et transformation de l'année dernière) évolue au cours du temps. Le physicien lui associe des qui sont mathématisées sous forme de grandeurs numérisées et mesurables.

La perception fait que ces grandeurs n'ont pas toujours la même valeur : il y du système. Même si cette évolution est la même, elle peut être différente cependant par un autre aspect.

Exemple : on met un certain système A composé d'eau initialement à $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ à chauffer à l'aide d'une cuisinière à gaz en utilisant un « petit feu ». En parallèle, on fait chauffer un système B de même volume d'eau avec la même température initiale sur la même cuisinière à gaz mais en utilisant un « grand feu ». Les deux systèmes évoluent, une des grandeurs permettant de mettre en évidence cette évolution est Celle-ci atteint $\theta_{2A} = 68^\circ\text{C}$ dans le premier récipient au moment où elle se met à bouillir dans l'autre (sous pression atmosphérique normale). L'évolution a-t-elle été la même ?

2) Variation

La notion de temps fait directement intervenir la notion d'échelle des durées avec des dates précises à partir d'une On gradue le temps. Les deux systèmes ont été mis à chauffer à la date $t_1 = 10\text{h}03$ de l'horloge. B commence à bouillir à $t_2 = 10\text{h}08$ et A commence à bouillir à $t_3 = 10\text{h}12$.

Entre deux t_1 et t_2 , Une grandeur G varie de G_1 à G_2 .

La variation de la grandeur G entre ces deux dates t_1 et t_2 notée est par définition

Unités :

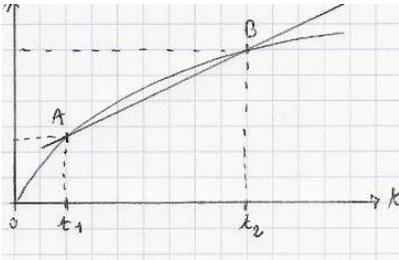
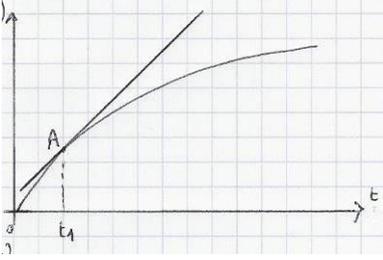
Exemple : quelle est la variation de température pour A et B entre t_1 et t_2 ? Et pour A entre t_2 et t_3 ?

3) Variation par unité de temps

Une constatation est immédiate : entre les deux premières dates, le système A a chauffé que le système B. Quelle nouvelle grandeur pourrait mettre en évidence cela ?

Qu'en est-il pour le système A entre t_1 et t_2 d'une part puis entre t_2 et t_3 d'autre part ?

Et comment traduire ce phénomène non plus entre deux dates mais à une date précise pour un système précis ?

Etude physique analytique	Etude physique graphique
Grandeur θ (ex : avancement) de la variable t (temps)	Représentation de la fonction θ en fonction du temps : t en, $\theta(t)$ en
<p>Problème posé : évaluer la plus ou moins grande variation de la grandeur θ par unité de temps sur une durée donnée $[t_1, t_2]$</p> <p>Calcul du</p> <p>.....</p> <p>en posant $\Delta t = t_2 - t_1$ (donc $t_2 = t_1 + \Delta t$)</p>	<p>Graphiquement, ce taux de variation correspond au</p> <p>.....joignant les points $A(t_1, \theta(t_1))$ et $B(t_2, \theta(t_2))$</p> 
<p>Problème posé : évaluer la plus ou moins grande variation de la grandeur θ par unité de temps à une date précise t_1</p> <p>Calcul de :</p> <p><u>Ainsi, la valeur de la dérivée d'une grandeur physique par rapport au temps à une date précise correspond à sa variation par unité de temps à cette date et vice-versa.</u></p>	<p>Graphiquement, cela correspond au coefficient directeur de la droite (AB) limite lorsque B tend vers A, c'est-à-dire au coefficient directeur de la à la courbe au point A (interprétation graphique du nombre dérivé en t_1)</p> 

4) Conservation

Une grandeur est dite conservative si et seulement si

Exemples :

II Mesure du temps et phénomène périodique

Lorsqu'on dit qu'un évènement dure deux fois plus longtemps qu'un autre, on fait référence à deux durées s'exprimant nécessairement par un certain nombre d'unités de temps. L'homme a utilisé et/ou construit des systèmes permettant de répéter à l'identique, dans la continuité ces unités de temps afin de les compter. Ces systèmes sont alors le siège d'un phénomène

Un phénomène est dit périodique lorsqu'il se répète identique à lui-même à intervalles de temps égaux.

1) Période et fréquence d'un phénomène périodique.

Phénomène périodique	Période (s)	Fréquence (Hz)
Arrivée du printemps chaque année		
Mouvement de la petite aiguille sur une pendule		
Mouvement de la trotteuse sur une montre		
Mouvement d'un moteur de voiture tournant à 1500 tours.min ⁻¹		
Signal sonore perçu par l'oreille écoutant un la ³ (à 440 Hz)		

La plus petite durée correspondant à la répétition d'un phénomène périodique s'appelle la période T du phénomène et s'exprime un s dans le SI (système international).

Il est utile de calculer la fréquence f correspondante à un phénomène périodique qui, lorsqu'elle est exprimée en Hz, correspond au nombre

- Exemple : si la période vaut 0,5 s, on compte deux périodes en une seconde donc la fréquence vaut 2 Hz. Si la période vaut 0,25s, la fréquence serait de ?

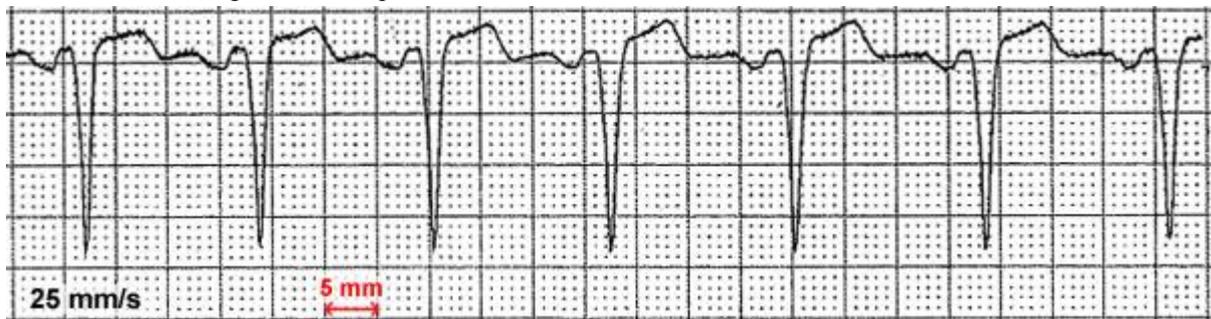
Le lien entre période et fréquence, si T est en s et f est en Hz est donc :

$$T = 1/f$$

- Donner la période et la fréquence des 5 phénomènes périodiques précédemment cités en posant votre calcul numérique dans les cases du tableau.

2) Calcul d'une période et/ou d'une fréquence

Voici l'électrocardiogramme d'un patient :



Le phénomène est-il périodique ?

Déterminer la période T des battements de son cœur et sa fréquence cardiaque exprimée en Hz puis en battements par minute (les médecins appelle alors cette grandeur plutôt la pulsation cardiaque).

3) Systèmes mécaniques avec mouvement périodique et mesure du temps

a) Conversion d'énergies lors des oscillations, conservation

Etant petit, vous aviez peut-être, installé au plafond de votre chambre, un objet comme un avion en bois (voir ci-contre) ou une araignée en peluche, relié à un ressort vertical qui, en le tirant depuis sa position d'équilibre, se mettait à osciller et vous vous êtes peut-être amusé à compter les périodes. Avec un QI de 200, vous vous seriez probablement posé la question de savoir quelles étaient les énergies mises en jeu lors de ce mouvement ainsi que leur conversion les unes avec les autres...

Lors de son mouvement vertical, l'avion voit évoluer 3 énergies différentes : son énergie cinétique, son énergie potentielle de pesanteur et son énergie potentielle élastique (due au ressort).

i) (*) Rappeler l'expression de l'énergie cinétique du système.

ii) (*) Rappeler ce qu'il faut définir pour l'énergie potentielle de pesanteur et donner son expression en fonction des grandeurs à introduire.

iii) (*) L'énergie potentielle élastique a pour expression $E_{pe} = \frac{1}{2} * k * (\ell - \ell_0)^2$ où k est appelée constante de raideur du ressort, ℓ est la longueur du ressort à la date t et ℓ_0 est la longueur à vide du ressort, c'est-à-dire sa longueur lorsque rien n'y est suspendu. L'énergie potentielle élastique ainsi définie peut-elle être négative ? Est-elle non nulle que quand le ressort est tendu ?



Vous avez à votre disposition un montage reflétant cet oscillateur appelé « pendule élastique vertical » en physique : il s'agit d'un objet massique telle une boule ou un « poids » des anciennes balances relié par un crochet à un ressort vertical accroché à une potence. Les buts de cette première partie de TP sont les suivants :

- enregistrement à l'aide d'une webcam du mouvement d'un mobile pour étude postérieure avec le logiciel virtualdub
- utilisation de Aviméca2 pour lire la vidéo et faire un pointage
- utilisation de regressi pour exploiter la vidéo et discuter.

(*) On (re)lira à l'avance les trois notices relatives à la webcam et virtualdub, à aviméca, à regressi présentes sur fiskim.com. Il est important de s'y référer le moins possible pendant le TP pour ne pas perdre de temps. On relira le TP de l'année dernière sur la chute d'une balle de golf ou de ping-pong où l'utilisation d'aviméca était explicitée pas à pas (rapporter éventuellement le TP présent sur fiskim, année 2014-2015 1S10).

• Enregistrement vidéo

Utiliser la webcam et le logiciel virtualdub pour enregistrer les oscillations du pendule élastique. On prendra garde :

- à visualiser sur la vidéo la position du crochet à vide et l'amplitude du crochet lors de quelques oscillations.
- à régler l'orientation de la webcam de sorte que le pendule soit bien vertical sur la vidéo (astuce à mémoriser : on peut se repérer avec le bord de l'écran de l'ordinateur en faisant glisser la fenêtre pour régler cette verticalité de prise de vue)
- à prendre un repère d'échelle visible lors de l'enregistrement (avec la règle graduée ou autre) pour spécifier à l'ordinateur les dimensions de l'enregistrement.
- à noter la longueur à vide du ressort et la masse de la boule (prendre la plus lourde). On indique que $k = 16 \text{ N.m}^{-1}$.
- à enregistrer la vidéo dans vos documents (lui donner un nom précisant les paramètres de l'expérience) ou sur le bureau.

• Traitement de la vidéo

Utiliser le logiciel avimeca2 pour visualiser la vidéo. Appeler le professeur.

Préciser bien sûr l'échelle à l'ordinateur.

Repère d'espace : choisir un axe vertical vers le haut avec une origine spatiale à la position à vide du point d'accroche.

Repère de temps : choisir l'origine des dates après quelques oscillations (lorsque l'image n'est plus floue)

Pointer alors le point d'accroche du ressort sur 3-4 périodes d'oscillations et exporter sur Regressi. Appeler le professeur.

• Exploitation sur regressi

Créer les grandeurs suivantes

"dérivée" $v_y = dy/dt$ (coordonnée verticale de la vitesse de l'objet)

"grandeurs calculées" : Energie cinétique $E_c = \frac{1}{2} m v_y^2$; Energie potentielle élastique $E_{pe} = \frac{1}{2} * k * y^2$; Energie potentielle de pesanteur $E_{pp} = \text{_____}$ (en prenant l'origine des E_{pp} sur la position à vide du point d'accroche) ; Energie mécanique $E_m = E_c + E_{pp} + E_{pe}$

Visualiser sur un même graphique toutes les énergies (même échelle à gauche). Appeler le professeur.

• Exploitation

Le système est-il périodique ? Quelles sont les périodes des énergies ? Interpréter.

Que peut-on dire de l'énergie mécanique ? Commenter.

Peut-on se servir de ce système en l'état pour définir une unité de temps. Pourquoi ? Appeler le professeur.

b) Paramètres influençant la période d'un oscillateur

Définition : un pendule simple est constitué d'un objet ponctuel de masse m accroché à l'extrémité d'un fil de longueur L sans masse et inextensible dont l'autre extrémité est fixe. Le pendule, déplacé correctement de sa position d'équilibre et lâché sans vitesse initiale se met à osciller dans un plan vertical.

Définition du mètre (8 mai 1790) : l'Assemblée Nationale française de la 1^{ère} République adopte le pendule battant la seconde à la latitude de 45° au niveau de la mer comme base d'une nouvelle unité de longueur et donne le 22 Août, 6 mois à l'Académie des sciences pour proposer, à partir de là, un système métrique complet. (attention : un pendule « battant la seconde » signifie qu'un aller-retour du pendule, donc une oscillation, dure 2 secondes).

i) (*) Pourquoi le pendule simple est-il un objet virtuel ?

Observer sur la paillasse le matériel à votre disposition : comment se rapprocher d'un pendule simple ?

ii) Mesure de la période et précision

a) (*) Proposer un protocole permettant de mesurer le plus précisément possible la période du pendule.

b) Donner une estimation de la précision de la période ainsi mesurée.

c) En réalisant 6 fois la mesure de T dans les mêmes conditions expérimentales, vérifier que l'estimation de la précision est correcte :

Mesure n°	1	2	3	4	5	6
Valeur de T						
Valeur moyenne de T sur les 6 mesures :						$T_{\text{moy}} =$
Ecart par rapport à la moyenne : $ T - T_{\text{moy}} $						
Ecart moyen :						$\Delta T_{\text{moy}} =$
Ecart relatif moyen :						$\varepsilon = \Delta T_{\text{moy}} / T_{\text{moy}} =$

iii) Paramètres dont dépend la période du pendule

a) (*) D'après la définition du mètre de 1790, citer deux paramètres dont dépend la période du pendule simple et trouvez-en deux autres qui pourrait également intervenir. Indiquer ces 4 paramètres éventuels sur un schéma récapitulatif.

b) (*) Rédiger un protocole pour connaître la dépendance ou non du caractère longueur L du pendule simple. Le mettre en place et conclure.

c) La période du pendule simple est donnée par l'expression : $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$

Rédiger un protocole utilisant les résultats de la question précédente pour vérifier cette dépendance particulière de L . Puis pour en déduire expérimentalement la valeur de g à Versailles. Appeler le professeur pour validation.

Indice de début d'année : on cherchera à représenter des mesures graphiquement et obtenir une dépendance linéaire car si elle est vérifiée, elle est très bien perçue par l'œil sur le graphique, et à déterminer alors un coefficient directeur.

En déduire l'écart relatif de g par rapport à la valeur dans les livres

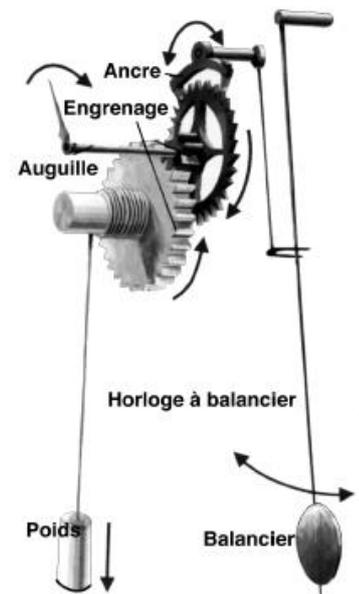
$$\varepsilon = \frac{|g_{\text{théorique}} - g_{\text{mesuré}}|}{g_{\text{théorique}}}$$

d) Dans les horloges, le pendule est couplé à un système de poids (voir ci-contre)

Source : <http://vivrealheure.e-monsite.com/pages/ii-mesurer-un-temps-artificiel/l-horlogerie-mecanique-de-precision.html>

Quel est le rôle du poids ?

Enfin, pourquoi, aujourd'hui, les systèmes mécaniques ne sont-ils plus utilisés pour définir la seconde ?



III La seconde : pourquoi son histoire est-elle si importante ?

Document 1 : de Galilée à nos jours, évolution de la notion de vitesse de la lumière, de la définition de la seconde et du mètre

Galilée, au début du XVII^{ème} siècle, fut un des premiers à penser que la lumière se propageait à vitesse finie. Il a tenté de mesurer cette vitesse en plaçant deux personnes éloignées de quelques kilomètres et munies d'horloges. Le temps mis par la lumière pour parcourir cette distance est de l'ordre de 10^{-5} s seulement, durée impossible à mesurer à l'époque, son expérience n'a donc pas été concluante.

Depuis Galilée, des mesures de plus en plus précises ont été effectuées. En 1983, cependant, le point de vue a changé : au lieu de définir précisément le mètre et la seconde et de mesurer la vitesse de la lumière en utilisant ces définitions, la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide est désormais fixée par convention. Elle vaut, par définition, $c = 299.792.458 \text{ m.s}^{-1}$. Cette donnée, ajoutée à la définition actuelle de la seconde, sert à définir le mètre.

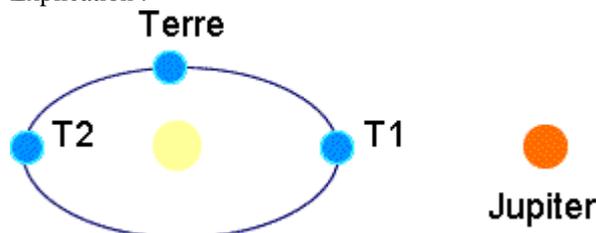
Chronologie de la seconde, du mètre et de la vitesse de la lumière

Une chronologie rapide de l'évolution des définitions de la seconde et du mètre, ainsi que de notre connaissance de la vitesse de la lumière, permet de mieux comprendre comment on en est arrivé à utiliser la vitesse de la lumière comme étalon de longueur :

La vitesse de la lumière : 1676

Après la tentative infructueuse de Galilée, Olaf Römer détermine pour la première fois un ordre de grandeur de la vitesse de la lumière en étudiant l'avance ou le retard apparent dans le mouvement des satellites de Jupiter (il étudie plus précisément l'intervalle entre deux occultations des satellites derrière la planète). Il constate que ce décalage par rapport à la théorie dépend de la distance que la lumière doit parcourir pour aller de la Terre à Jupiter. Il en déduit une première approximation de la vitesse de la lumière.

Explication :



Dans la position T₁, la Terre est sur le point de son orbite le plus proche de Jupiter. Dans la position T₂, la Terre est dans sa position la plus éloignée de Jupiter. La lumière met 1000 s soit à peu près 17 minutes de plus pour arriver à T₂, en provenance du voisinage de Jupiter, que pour arriver à T₁. Cette constatation permet, connaissant la distance qui nous sépare du Soleil, de déterminer un ordre de grandeur de la vitesse de la lumière ($3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1} = 2 \times 1,5 \times 10^{11} \text{ m} / 1000 \text{ s}$).

Le mètre : 1795

Première tentative pour unifier les unités de mesure de longueurs : les révolutionnaires français décident de choisir une unité de longueur qui soit parfaitement universelle, sans "rien d'arbitraire ni de particulier à la situation d'un peuple sur le globe". Les dimensions de la Terre obéissent à ces conditions : elles ne sont pas plus françaises qu'anglaises ou chinoises. Le mètre est ainsi défini comme la 1/40.000.000^{ème} partie du méridien terrestre. Cette valeur n'est toutefois pas totalement indépendante du méridien considéré... pour plus de précision, le mètre est alors défini comme la dix millionième partie du quart Nord du méridien de Paris

Par définition, le méridien terrestre est donc un nombre entier (4×10^7) de mètres! La définition actuelle du mètre est proche de la définition de l'époque, en effet, un méridien terrestre fait à peu près $2\pi \times 6,37 \times 10^6 \text{ m} = 4,00 \times 10^7 \text{ m}$ si on garde 3 chiffres significatifs.

La seconde : début du dix-neuvième siècle

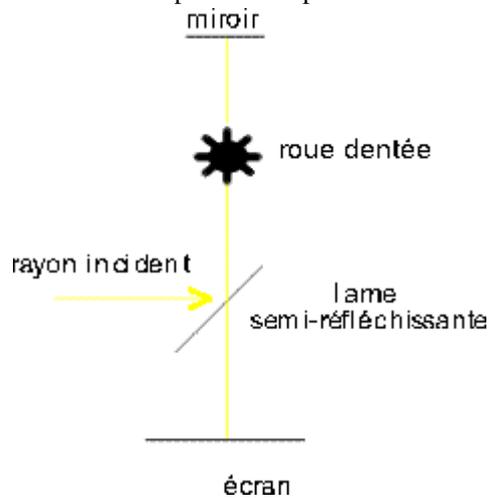
La seconde est définie comme la 1/86.400^{ème} partie du jour solaire **moyen**. On doit définir la seconde à partir d'une valeur moyenne car le jour solaire véritable (temps séparant deux passages successifs du soleil au méridien du lieu considéré) varie selon la période de l'année à laquelle on se trouve, essentiellement du fait de l'ellipticité de la trajectoire de la Terre. On sait qu'une orbite elliptique n'est pas parcourue à vitesse constante, la Terre se déplace ainsi plus vite lorsqu'elle est près du Soleil que lorsqu'elle en est éloignée. Cette irrégularité de la vitesse de la Terre a une influence sur la durée du jour solaire qui varie donc dans le courant de l'année : il est compris entre 23 h 59 min 39 s et 24 h 0 min 30 s. Si on fait la moyenne sur l'année, c'est-à-dire sur la totalité de l'orbite terrestre, cependant, on obtient le jour solaire moyen, qui, dans l'idéal d'un mouvement terrestre parfaitement périodique d'une année sur l'autre, devrait être constant.

À cet étalon de durée est associé un « temps », le « Temps Universel » (T.U.) qui correspond au temps solaire moyen du méridien de Greenwich augmenté de 12 h (à « midi solaire moyen », le temps solaire moyen est 0).

La vitesse de la lumière : 1848 à 1878

D'importantes avancées sont réalisées dans la connaissance de la vitesse de la lumière. En 1849, H. Fizeau améliore la mesure de la vitesse de la lumière à l'aide d'une roue dentée occultant périodiquement la lumière (cette mesure est en fait une mesure de la vitesse de la lumière dans l'air), L. Foucault, en 1850, invente un dispositif de miroirs (l'un d'entre eux tourne à grande vitesse : 300 tours/seconde) et mesure grâce à celui-ci la vitesse de la lumière dans l'eau, et en 1878, Michelson et Morley réalisent une mesure de la vitesse de la lumière précise à 50 km/h près.

Pour en savoir plus sur l'expérience de Fizeau :



H. Fizeau



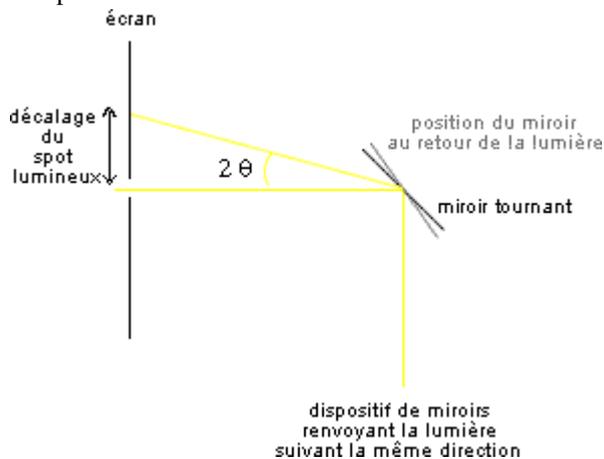
L. Foucault



A. Michelson

Fizeau a envoyé de la lumière entre Suresnes et Montmartre. Cette lumière passe à travers une roue dentée en mouvement, parcourt la distance Suresnes-Montmartre, est réfléchie par un miroir, et revient sur la roue dentée pour arriver, si elle n'est pas occultée par une dent, sur un écran. Pour certaines vitesses de rotation de la roue, rien n'arrive sur l'écran, car la lumière est soit occultée au départ par une dent, soit occultée lors de son deuxième passage à travers la roue. Connaissant la vitesse de rotation de la roue, l'intervalle entre deux dents, et la distance parcourue par la lumière, on peut en déduire une bonne approximation de la vitesse de la lumière

L'expérience de Foucault :



Un dispositif de miroirs permet à une source d'envoyer de la lumière qui revient à son point de départ, si tous les miroirs sont fixes, après avoir parcouru une distance de 20 m. Si un des miroirs est maintenant mis en rotation, la lumière est légèrement décalée à son retour vers la source. Ce décalage est proportionnel à l'angle dont a tourné le miroir pendant le temps que met la lumière à parcourir son trajet dans le dispositif. Avec un miroir tournant à une vitesse de plusieurs centaines de tour par seconde, on peut obtenir un décalage mesurable et en déduire la vitesse de la lumière.

Le mètre : 1889

La longueur du mètre est désormais celle du mètre étalon déposé au Bureau des Poids et Mesures à Sèvres. Le lycée Hoche possède dans ses collections une maquette du mètre étalon de Sèvres.

La seconde : 1956

Le jour solaire moyen n'est pas tout à fait constant car le mouvement de la Terre n'est pas parfaitement périodique. Il y a des écarts de 1 à 2 s par an. De plus, la Terre, freinée par les marées, voit la durée d'un jour solaire moyen augmenter légèrement au fil des années (de $1,64 \times 10^{-5}$ s/an). On propose donc une définition de la seconde plus rigoureuse : la seconde sera définie comme $1/31.556.925,9747^{\text{ième}}$ de la durée de l'année tropique (durée séparant deux équinoxes de printemps successives) 1900. Le temps correspondant est le « Temps des Ephémérides » (T.E.).

Le mètre : 1960

Les transitions atomiques sont de bons candidats pour fournir de meilleures définitions des unités fondamentales. Elles donnent des valeurs plus précises que celles fondées sur les dimensions ou les mouvements de la Terre. Le mètre est défini comme 1.650.763,63 fois la longueur d'onde dans le vide de la radiation qui correspond à la transition entre les niveaux 2p₁₀ et 5d₅ de l'isotope 86 du Krypton.

La seconde : 1967

C'est au tour de la seconde d'être définie à partir des transitions atomiques : la fréquence de transition entre les 2 niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de Cesium 133 est, par définition, $F = 9.192.631.770$ Hz. Cette définition a une exactitude de 2×10^{-14} soit un décalage d'une seconde tous les 1.500.000 ans !

Cette nouvelle définition de la seconde définit un nouveau temps, le « Temps Atomique International » (T.A.I.). Un compromis a été trouvé avec le « Temps Universel », c'est le « Temps Universel Coordonné » (U.T.C. pour l'abréviation anglaise) qui utilise la seconde du T.A.I. et ajoute ou retranche le cas échéant une seconde à l'année le 31 décembre à 24 heures ou le 30 juin à 24 heures, de façon à ce qu'en valeur absolue, l'écart entre le Temps Universel et le Temps Universel Coordonné soit toujours inférieur à 0,9 s.

La vitesse de la lumière et le mètre : 1983

Dernière définition du mètre : elle fait intervenir la vitesse de la lumière. Par définition, on a fixé la vitesse de la lumière dans le vide à $c = 299.792.458$ m.s⁻¹. Suivant cette définition, la donnée de la seconde suffit à définir le mètre. Cette vitesse est un étalon de mesure idéal. En effet, contrairement à certains des étalons choisis précédemment (comme le jour solaire moyen), c est rigoureusement constante et elle est indépendante de l'observateur considéré (qu'il soit au repos ou en mouvement).

Pourquoi cette « course à la précision » ?

Cette « course à la précision » est-elle utile, et à qui ? A-t-elle des applications dans la vie courante ? Pourquoi définir la seconde avec une exactitude de 2×10^{-14} plutôt que de "seulement" 10^{-7} , par exemple ? En fait, un grand nombre d'instruments utilisent des mesures de durée pour déterminer des distances (via la valeur de la vitesse de la lumière) : le télémètre laser, le GPS, etc... Dans un grand nombre de ces applications, une grande précision sur la valeur de la seconde est cruciale : supposons que l'on fasse une erreur de 10^{-7} secondes sur la mesure du temps, par exemple, comme la vitesse de la lumière est $c = 299.792.458$ m.s⁻¹, cette incertitude sur la mesure du temps correspond à une erreur sur les distances de 30 mètres environ. Cette erreur est inadmissible si on souhaite, par exemple, téléguidé un avion pour qu'il sorte d'un hangar !

D'après le site de l'ens Lyon, auteur Gabrielle Bonnet <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/VLum.xml>

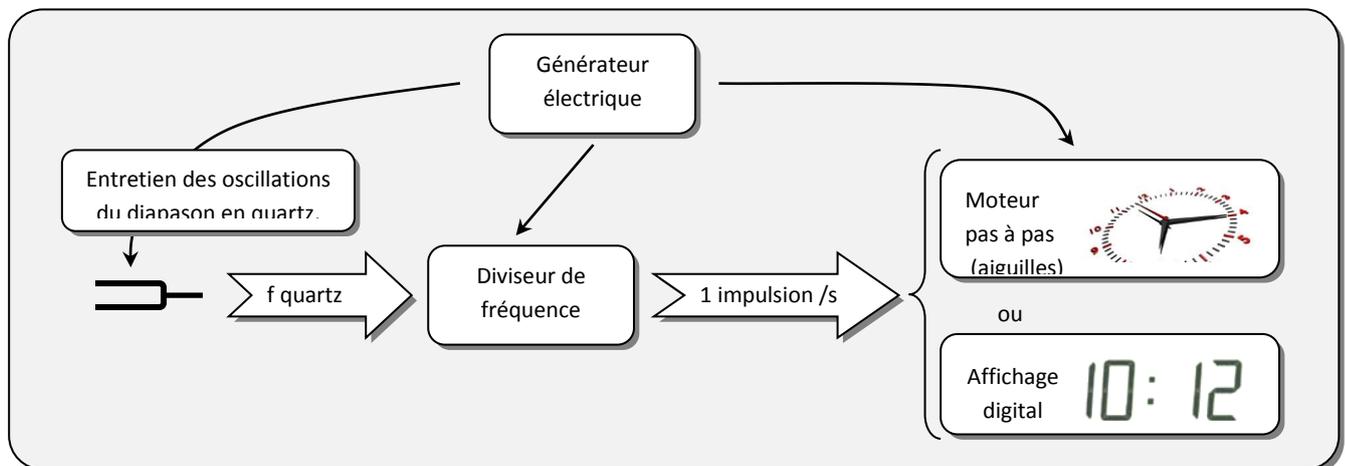
Document 2 : conférence de Noel Dimarcq - Une brève histoire de la mesure du temps, 2012

Voir la conférence en ligne en suivant le lien suivant : <https://www.youtube.com/watch?v=z3uDFcKI8wg>

Document 3 : différentes horloges

1. L'horloge à quartz

Fonctionnement d'une horloge à quartz : la vibration d'un diapason en quartz est entretenue à une fréquence fixe à l'aide d'un générateur électrique puis un système électronique compte 2^{15} oscillations, c'est-à-dire 1 s, et envoie alors une impulsion pour changer l'affichage (+1s) ou au moteur pas à pas pour faire avancer la « trotteuse » d'une seconde.



« Les premières montres à quartz avaient environ 4 kHz ($2^{12} = 4096$) de fréquence. La génération suivante vibrait à $2^{15} = 32768$ Hz ... », « ... les meilleures montres actuelles sont à environ 4 MHz ... », « ... la plus précise (+/- 5 s par an) ... » <http://www.scribd.com/doc/31110292/Montres-a-quartz>

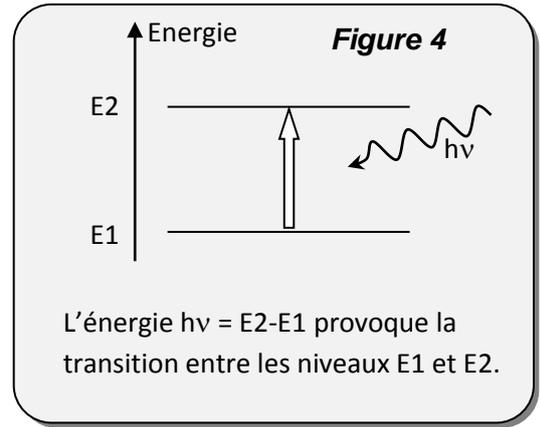
2. Les horloges atomiques

Dans les horloges atomiques on utilise la connaissance de la fréquence ν provoquant une transition énergétique de particules pour mesurer la période correspondante et ainsi définir l'unité de temps : la seconde.

Comme toute grandeur physique, la fréquence ν est plus ou moins imprécise. Cette imprécision est d'origine naturelle et n'est pas due à une erreur de mesure. Elle provient de la **durée de vie** des niveaux excités, de **l'effet doppler** causé par le mouvement des particules et des **chocs entre particules** du fait de leur agitation thermique...

Le césium 133 est un des atomes minimisant ces effets négatifs :

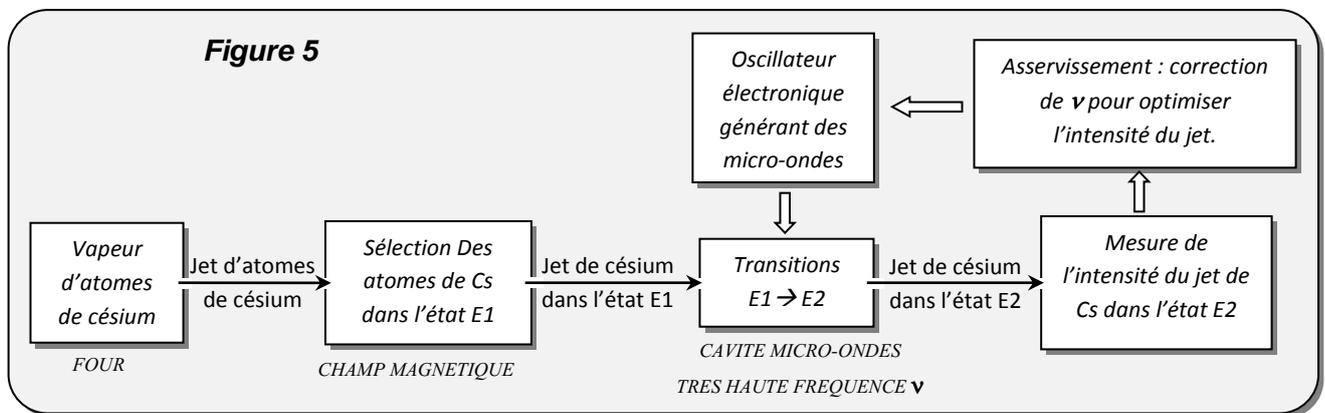
« ... le césium est prisé pour son rôle dans la mesure du temps en raison de son atome, dont la structure interne se caractérise par une stabilité exceptionnelle. » <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/education/innovations/decouvertes/horloge.html>



1. Principe d'une horloge atomique au Cs133

On crée un jet d'atomes de Cs 133 en chauffant du césium dans un four percé d'un orifice (voir schéma ci-dessous). On obtient alors des atomes dans plusieurs niveaux quantiques et on sélectionne ceux qui sont dans le niveau que nous appellerons E1 en faisant passer ce jet dans un champ magnétique. Le jet passe ensuite dans une enceinte où règnent des micro-ondes électromagnétiques de fréquence ν capable de provoquer les transitions $E1 \rightarrow E2$. La fréquence de ces ondes est pilotée par un système comportant un résonateur en quartz (quelques MHz) comme dans les montre du même nom, mais dont on multiplie la fréquence jusqu'à atteindre celle provoquant les transitions : 9 192 631 770 Hz.

Cette fréquence est susceptible de dériver auquel cas elle provoque moins ou peu de transitions. Il suffit de mesurer le flux des atomes dans l'état E2 relativement à ceux dans l'état E1 pour savoir si on est à la bonne ν . Pour cela un deuxième filtre magnétique sépare les deux sortes d'atomes et permet leur comptage. Il suffit alors de corriger la fréquence jusqu'à optimiser le nombre de transitions.

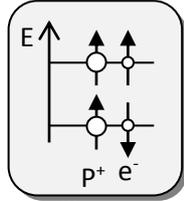


Précision de l'horloge au Cs 133 : Sa dérive temporelle est de l'ordre de 1s pour plusieurs centaines de milliers d'années

2. L' horloge atomique appelée « MASER à hydrogène »

Le MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) inventé en 1953, est l'ancêtre du LASER.

Il s'agit d'une horloge d'une technologie sensiblement différente de la précédente : elle fonctionne comme un LASER. Elle utilise la fréquence = 1 420 405 751, 782 6 Hz correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins suivants de l'hydrogène : le premier où les spins du noyau et de l'électron sont antiparallèles et le second où ils sont parallèles. Ce type d'horloge est plus précis que celles au Cs 133.



« Orolia a développé depuis 2001 un maser à hydrogène passif spatialisé pour le système de navigation par satellites Galileo (...). Ce maser(...)aux performances inégalées par d'autres technologies, sera l'horloge primaire de Galileo et lui conférera son niveau de précision sub-métrique sans équivalent dans les autres systèmes de navigation. »

(<http://www.orolia.com/pdf/masers.pdf>) <http://tempsatomique.chez.com/masershydrogene.htm>

Remarque : le spin de l'électron est une propriété intrinsèque d'ordre magnétique de la particule (tout comme sa masse ou sa charge sont d'autres propriétés intrinsèques) pouvant prendre deux « orientations » possibles.

Précision de ce type d'horloge : Sa dérive temporelle est de l'ordre de 1s pour plusieurs dizaines de millions d'années

3. Les horloges optiques

« Horloge optique: nouveau record de précision battu

Grâce à un seul ion d'aluminium, une horloge peut faire «tic-tac» pendant 3,7 milliards d'années en restant précise à la seconde près. Cette nouvelle horloge optique, mise au point par une équipe du NIST (National Institute of Standards and Technology, Boulder) aux États-Unis, est beaucoup plus précise que les horloges atomiques qui servent actuellement d'étalon pour mesurer la seconde. Elle bat également les records établis par d'autres horloges optiques expérimentales.

Mises au point dans au milieu des années 50, les horloges atomiques sont devenues la référence universelle pour la mesure du temps dans les années 70 (remplaçant ainsi la mesure basée sur la rotation de la Terre).

Ces horloges atomiques, qui utilisent des atomes de césium 133, se servent des «vibrations» des atomes pour battre la mesure du temps. Elles se sont perfectionnées au point de rester exactes à la seconde près pendant 80 à 100 millions d'années (en supposant qu'elles soient en place pendant tout ce temps-là..)

Cependant une nouvelle génération d'horloge encore plus précise est en cours d'élaboration dans les laboratoires. Elles utilisent toujours les vibrations de l'atome mais ont remplacé les microondes par des ondes lumineuses (avec des fréquences beaucoup plus hautes) pour faire «vibrer» ces atomes (d'où le terme d'horloge optique). Résultat : le temps est découpé en unités encore plus petites qu'avec les horloges à césium. Plusieurs prototypes sont à l'étude.

Le dernier record de précision en date était détenu depuis 2008 par une horloge optique utilisant un ion mercure, également mise au point par le NIST, ne prenant une seconde de retard qu'au bout de 1,7 milliards d'années.

Avant de remplacer les horloges atomiques comme maître étalon de la seconde, les horloges optiques devront encore faire l'objet de plusieurs années de recherches (afin de trouver l'ion qui donne les meilleurs résultats), de mises au point et de vérifications. »

Cécile Dumas **Sciences-et-Avenir.com** 15/02/10

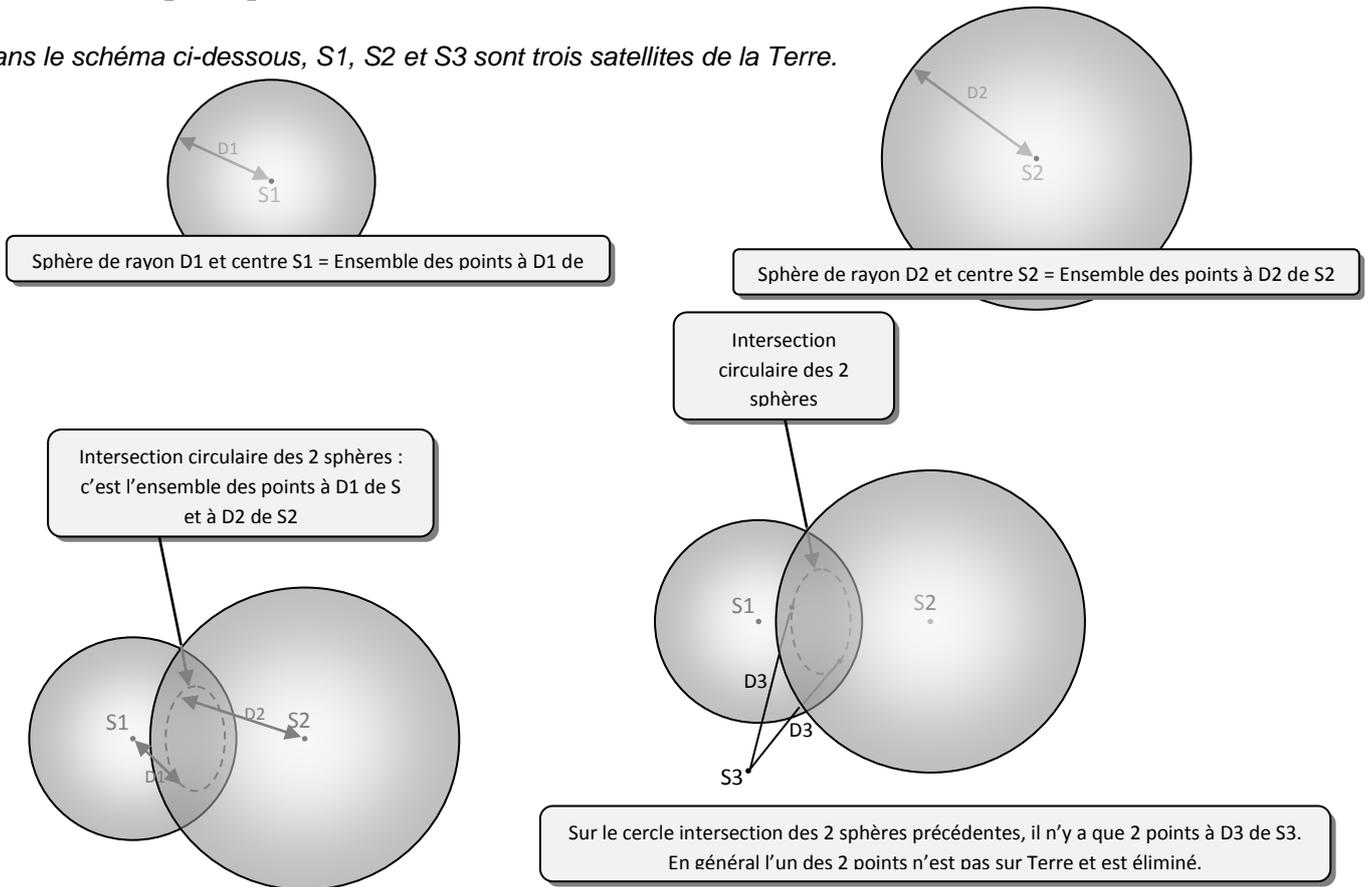
(<http://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/20100215.OBS7056/horloge-optique-nouveau-record-de-precision-battu.html>)

Précision des horloges optiques : Dérive temporelle est de l'ordre de 1s pour 1,7 milliards d'années.

Remarque : Dans les récepteurs GPS commerciaux (voitures...) l'horloge est une simple horloge à quartz pour des raisons de coût et d'encombrement compréhensibles, mais cela conserve une précision suffisante de la localisation puisqu'elle est constamment synchronisée avec les horloges atomiques des satellites grâce au quatrième satellite.

Document 4 : principe du GPS

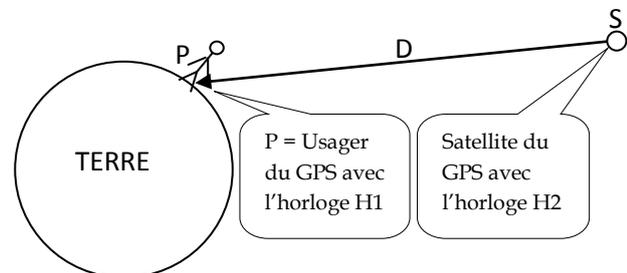
Dans le schéma ci-dessous, S_1 , S_2 et S_3 sont trois satellites de la Terre.



Actuellement les GPS déterminent les positions à la surface terrestre à moins d'un mètre près.

H_2 émet un bip à la date t et H_1 le reçoit à la date $t' = t + \Delta t$.
Si H_1 et H_2 sont parfaitement synchronisées Δt sera la durée du voyage SP . Alors $D = c \cdot \Delta t$.

Dans la technologie GPS, 3 satellites permettent de situer P par rapport à eux (triangulation) et un quatrième permet de synchroniser en permanence les différentes horloges qui se décalent entre elles pour différentes raisons.



Questions :

- 1) Expliquer pourquoi la définition de la seconde est-elle liée à la détermination de la célérité de la lumière et à la définition du mètre. Quelles ont été les grandes étapes de la définition de la seconde ? Pourquoi le temps atomique est-il retenu aujourd'hui et non plus le temps astronomique ?
- 2) Comparer les précisions données des différentes horloges présentées dans le document 3 en calculant l'incertitude de chacune d'elle.
- 3) Exposer brièvement le principe d'un GPS. Parmi les différentes horloges de la question précédente, quelles sont celles qui peuvent être utilisées pour un GPS ? Justifier.
- 4) Citer un phénomène au programme de TS qui peut perturber la précision des horloges atomiques. Préciser également un système optique très élaboré pouvant servir d'horloge au programme de TS. Trouver enfin pourquoi les horloges des satellites en mouvement sont désynchronisées par rapport à la Terre. A quelle partie du programme de TS cela fait-il référence ? Quelles sont les pages correspondantes dans le livre d'Einstein et d'Infeld ?