

Oscillateurs et mesure du temps

Qu'est-ce que le temps ?

« Qui pourra le définir [le temps] ? et pourquoi l'entreprendre, puisque tous les hommes conçoivent ce qu'on veut dire en parlant du temps sans qu'on le désigne davantage ? »

Blaise Pascal (1623-1662), Pensées part. I, art. 2

Faute de pouvoir le définir simplement, nous nous contentons généralement de le subir. Les oscillateurs et leur périodicité sont des outils parfaits pour mesurer le temps : voyons comment.

1 - Oscillateurs mécaniques

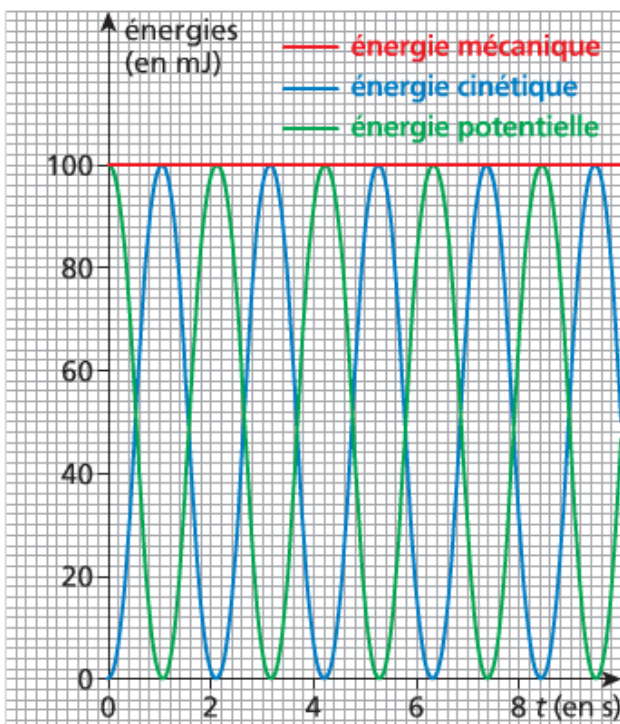
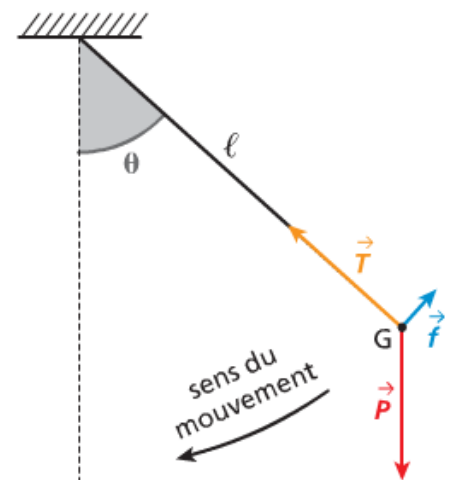
Un oscillateur mécanique est un système animé d'un mouvement périodique de part et d'autre d'une position d'équilibre. On note T la période des oscillations et f leur fréquence.

1.1 - Le pendule simple

Un pendule pesant est un objet en oscillation dans un plan vertical sous l'effet de la pesanteur. Il est modélisé par un pendule simple, objet ponctuel G de masse m accroché à un fil sans masse et inextensible de longueur ℓ .

A l'équilibre, le fil est vertical ; la position de G en mouvement est repérée par l'écart angulaire θ entre le fil et sa position d'équilibre.

L'objet est soumis à son poids \vec{P} , à la force de rappel \vec{T} et aux frottements de l'air \vec{f} . La poussée d'Archimède est négligée. La force de frottements est perpendiculaire à la direction du mouvement : elle ne travaille pas.



Si les frottements peuvent être négligés, l'énergie mécanique du pendule est constante au cours du temps

$$E_m = E_c + E_{pp} = cste$$

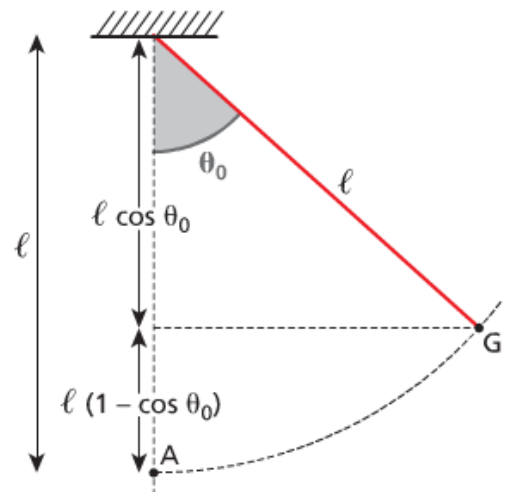
L'énergie cinétique se transforme en énergie potentielle de pesanteur, et réciproquement, au cours du mouvement.

Exercice

Un pendule est modélisé par un point G de masse $m = 100 \text{ g}$ accroché à un fil de longueur $\ell = 40 \text{ cm}$. Il est lâché sans vitesse initiale d'un angle $\theta_0 = 10^\circ$ avec sa position d'équilibre. Tout frottement est négligé.

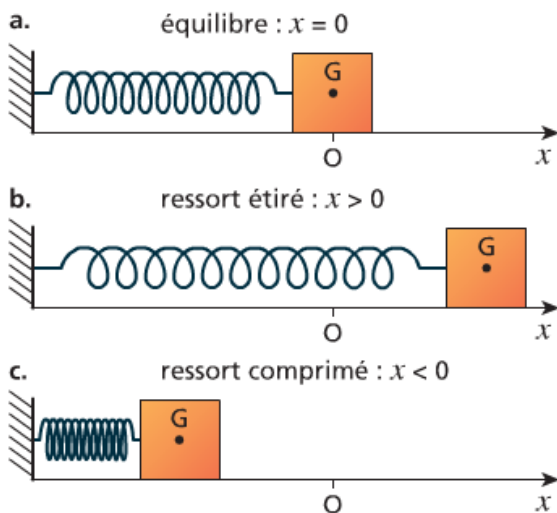
Calculer la vitesse v_{\max} de G au passage par sa position d'équilibre.

Réponse : $v_{\max} = 0,35 \text{ m.s}^{-1}$.



1.2 - Pendule élastique

Dans un domaine restreint d'allongement, la force exercée par un ressort sur l'opérateur est proportionnelle à l'allongement : $F = k.x$ où k est la constante de raideur du ressort en N.m^{-1} . Ceci constitue la loi de Hooke.



Un pendule élastique est composé d'un objet de masse m accroché à l'extrémité d'un ressort de constante de raideur k . A l'équilibre, le ressort n'est ni allongé, ni étiré. La position de l'objet est repérée par l'élongation x du ressort.

Du fait de l'allongement ou du raccourcissement du ressort, le système emmagasine de l'énergie potentielle élastique d'expression

$$E_{pe} = \frac{1}{2} k x^2$$

Si tous les frottements peuvent être négligés, l'énergie mécanique du pendule est constante,

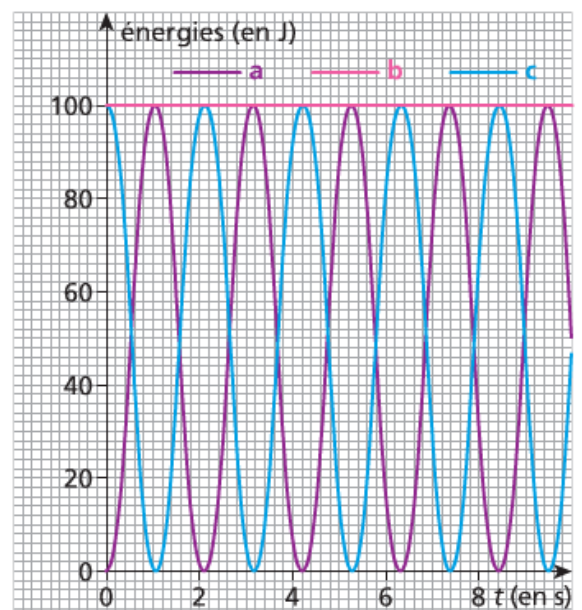
$$E_m = E_c + E_{pe} = cste$$

L'énergie cinétique se transforme en énergie potentielle élastique, et réciproquement, au cours du mouvement.

Exercice

Le pendule élastique, initialement non étiré, est lancé avec une vitesse initiale. Identifier les courbes d'énergies et déterminer la période du pendule.

Réponse : (a) énergie potentielle élastique, (b) énergie mécanique, (c) énergie cinétique.



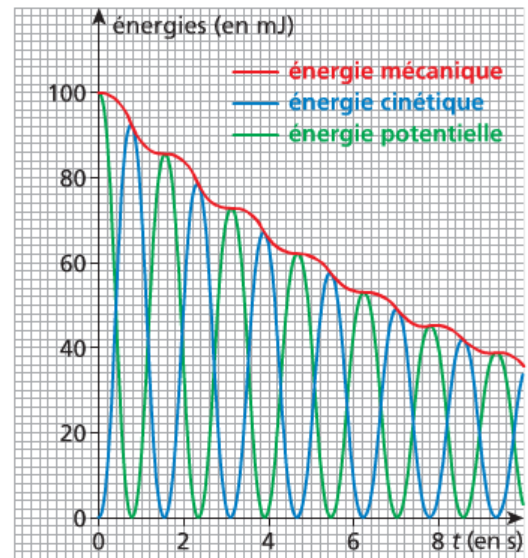
Remarque : pour un pendule élastique vertical, il faut tenir compte de la contribution de pesanteur à l'énergie potentielle, $E_p = E_{pe} + E_{pp}$.

1.3 - Dissipation d'énergie

Même lorsque les frottements sont très faibles, ils entraînent un amortissement des oscillations du pendule au bout d'un temps assez long.

Les oscillations s'accompagnent d'une dissipation d'énergie, c'est-à-dire d'une diminution progressive de l'énergie mécanique, par transfert thermique entraînant l'échauffement du milieu.

L'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique au cours du temps ont alors les allures caractéristiques ci-contre. Il est alors possible de déterminer le travail des forces de frottements entre deux dates : il est gal à la variation de l'énergie mécanique.



2 - Définition et mesure du temps

La seconde (s) est l'unité de mesure d'une durée dans le Système international.

2.1 - Oscillateurs et mesure du temps

De nombreux dispositifs de mesure du temps utilisent des oscillateurs mécaniques. Leur période sert de référence de durée : mesurer le temps revient à compter un nombre d'oscillations de période connue.

Période des oscillations d'un pendule simple

Pour de petites oscillations, la période T d'un pendule simple de longueur ℓ est

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

où g est la valeur du champ de pesanteur. On remarque que la période est indépendante de la masse du pendule.

Exercice : analyse dimensionnelle

$$\text{Réponse : } \left[2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} \right] = [2\pi] \frac{[\ell]^{1/2}}{[g]^{1/2}} = \frac{L^{1/2}}{(LT^{-2})^{1/2}} = T$$

Ici, 2π correspond à une mesure d'angle en radians (adimensionnée, donc) : l'explication de sa présence réside dans la périodicité du système (il boucle, comme le cercle...). On utilise le résultat de la 2^{ème} loi de Newton appliquée à un système en chute libre $\vec{a} = \vec{g}$ pour extraire la dimension de g .

Exercice : déterminer la longueur du pendule qui bat la seconde

Réponse : attention, $T = 2$ s ! on a alors $\ell_{1s} = 1$ m... Coïncidence ? Non !

Période des oscillations d'un pendule élastique

La période T d'un pendule élastique comportant un solide de masse m accroché à un ressort de raideur k est

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Exercice : analyse dimensionnelle

$$\text{Réponse : } \left[2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \right] = [2\pi] \frac{[m]^{1/2}}{[k]^{1/2}} = \frac{M^{1/2}}{[F/x]^{1/2}} = \frac{M^{1/2}}{(M.L.T^{-2}.L^{-1})^{1/2}} = T$$

On utilise ici la 2^{ème} loi de Newton, $\sum \vec{F} = m \times \vec{a}$ pour extraire la dimension de F .

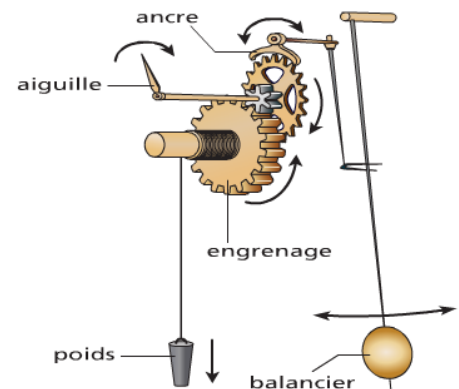
2.2 - Evolution de la mesure de la seconde

Les phénomènes astronomiques périodiques servent de référence à la mesure du jour et de l'année depuis la Préhistoire.

Pour mesurer des durées plus petites, les dispositifs mécaniques perfectionnés à partir du XVII^{ème} 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

Les oscillateurs mécaniques sont soumis à la force des frottements responsables 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.



Principe de fonctionnement d'une horloge mécanique à balancier.



Dans les montres mécaniques, le ressort spiral tient lieu de balancier.

La variabilité des périodes d'oscillations en fonction des conditions atmosphériques ou du lieu, l'usure des mécanismes rendent l'utilisation de tels dispositifs incompatible avec un besoin de grande précision.

2.3 - Définition actuelle de la seconde

Un atome peut subir une transition vers un niveau d'énergie supérieure lorsqu'il reçoit un photon. Il faut pour cela que la fréquence ν de la radiation associée corresponde exactement à une transition énergétique ΔE possible de cet atome, telle que $\Delta E = h\nu$ où $h = 6,62.10^{-34}$ J.s est la constante de Planck.

La seconde est actuellement définie comme la durée d'exactly 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux particuliers de l'atome de césium 133.

Exercice : calculer ΔE .

Réponse : $6,09 \cdot 10^{-24} \text{ J}$

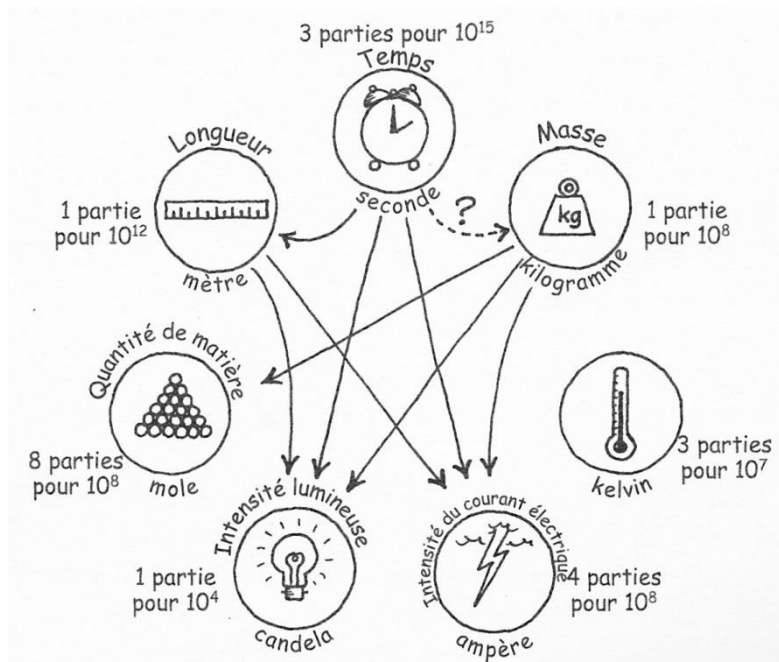
Le choix du césium se justifie par le fait que la transition utilisée est facilement réalisable et très stable. L'atome ne s'use pas et est universel : il est donc judicieux d'utiliser des horloges atomiques pour mesurer le temps.

Des horloges utilisant d'autres éléments que le césium sont à l'étude, avec l'objectif de rechercher toujours plus de stabilité.

Les horloges atomiques actuelles ne retardent que d'une seconde tous les 4 milliards d'années !



Ouverture : L'avenir du système international des unités



Seule la masse reste définie à l'aide d'un étalon entreposé au palais de Breteuil à Sèvres.
L'idée est de s'en défaire : tout reposerait sur la définition de la seconde !

Une petite histoire de la seconde

Les phénomènes périodiques permettent d'envisager la mesure du temps : il faut néanmoins définir pour cela une unité, la seconde.

Le temps « observé »

Les cycles du Soleil et de la Lune sont communs à tous les hommes : ils définissent leurs calendriers et, pendant très longtemps, la seconde est définie à partir de l'année (révolution de la Terre autour du Soleil). Au début du XX^{ème} siècle, le Temps Universel (UT) fait son apparition, avec le développement des transports et des télécommunications : il est alors basé sur le temps solaire moyen à Greenwich (GMT).

Le temps « fabriqué »

A mesure que ses savoirs progressent, l'homme les utilise pour concevoir des instruments de mesure du temps : au XVIII^{ème} siècle, les pendules mécaniques permettent de gagner en précision. Dans les années 1920, la piézoélectricité du cristal de quartz est utilisée pour fabriquer des oscillateurs particulièrement stables.

L'ère de l'atome

Dans la vie quotidienne, il semble que la durée ou le rythme sont plus importants que l'heure exacte. La géolocalisation (GPS), les communications (haut débit) ou encore les tests des théories physiques nécessitent l'utilisation d'étalons de temps universels, pérennes, stables et exacts : les propriétés quantiques de l'atome permettent cette prouesse.

Date	Avant 1956 Greenwich Mean Time (1884)	Entre 1956 et 1967 Temps des Ephémérides	Depuis 1967 Temps Atomique International
Définition	1 s = 1/86400 du jour solaire terrestre moyen	1 s = 1/31556925,9747 de l'année tropique 1900	1 s = 9 192 631 770 périodes de la radiation associée à une transition hyperfine de l'état fondamental de ¹³³ Cs
Commentaire	Le jour solaire fluctue, sa moyenne est instable.	Des calculs compliqués... bien que l'échelle soit stable (1 s en 10 ans)	Une référence <u>universelle</u> du temps est donnée par des horloges atomiques disséminées.

