

# Chapitre 9

## Les oscillateurs et la mesure du temps

### Table des matières

<b>1 Oscillateurs mécaniques</b>	<b>2</b>
1.1 Pendule simple . . . . .	2
1.2 Pendule élastique (ressort horizontal) . . . . .	3
1.3 Dissipation d'énergie . . . . .	4
<b>2 Mesure du temps</b>	<b>5</b>
2.1 Oscillateurs et mesure du temps . . . . .	5
2.2 La mesure de la seconde avec des horloges mécaniques . . . . .	5
2.3 La mesure de la seconde avec des horloges atomiques . . . . .	6

## Introduction

L'étude quantitative des oscillations a commencé avec Galilée en observant le balancement d'un lustre suspendu à la voûte de la cathédrale de Pise. Il découvre ainsi les lois qui régissent les oscillations qui sont à la base des premiers horloges à pendule.

La première pendule est mise en place par Huygens dans les années 1650 suivie par le chronomètre de Harisson une centaine d'années plus tard. Les instruments de cette époque commencent à atteindre une précision de l'ordre de quelques dizaines de secondes par jour.

La problématique de la mesure du temps par des oscillateurs mécaniques est liée à des questions énergétiques.

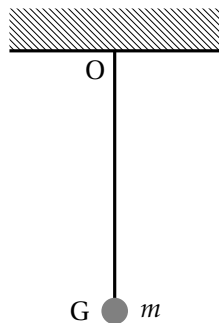
## 1 Oscillateurs mécaniques

Un oscillateur mécanique est un système animé d'un mouvement périodique de part et d'autre d'une position d'équilibre. Dans ce qui suit, la période des oscillations est notée  $T$  et leur fréquence est notée  $f$ .

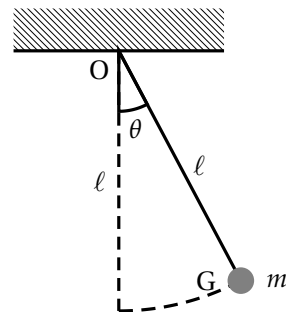
### 1.1 Pendule simple

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 qui est constitué d'un objet ponctuel  $G$  de masse  $m$  accroché à un fil sans masse (de masse négligeable devant  $m$ ) et de longueur  $\ell$  très supérieure aux dimensions du solide.

À l'équilibre, le fil est vertical. La position de  $G$  en mouvement est repérée par l'angle  $\theta$  entre le fil et sa position d'équilibre (écart ou abscisse angulaire).



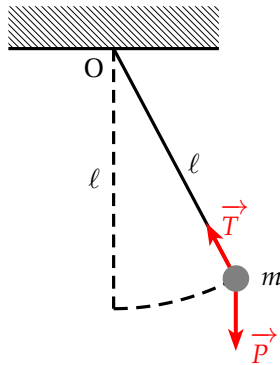
Pendule simple en position d'équilibre



Pendule simple dont la position est repérée par l'abscisse angulaire  $\theta$

L'objet est soumis à son poids  $\vec{P}$ , à la tension du fil  $\vec{T}$  à la force des frottements de l'air  $f$  et à la poussée d'Archimède  $\Pi$ .

Le travail de la tension du fil  $\vec{T}$  est nul car cette force est perpendiculaire à chaque instant au vecteur déplacement.



Les forces exercées sur le pendule simple sont la tension du fil  $\vec{T}$  et le poids  $\vec{P}$  (si on néglige la force de frottement et la poussée d'Archimède)

Donc, si on néglige la force des frottements et la poussée d'Archimède, l'énergie mécanique du pendule est constante au cours du temps :

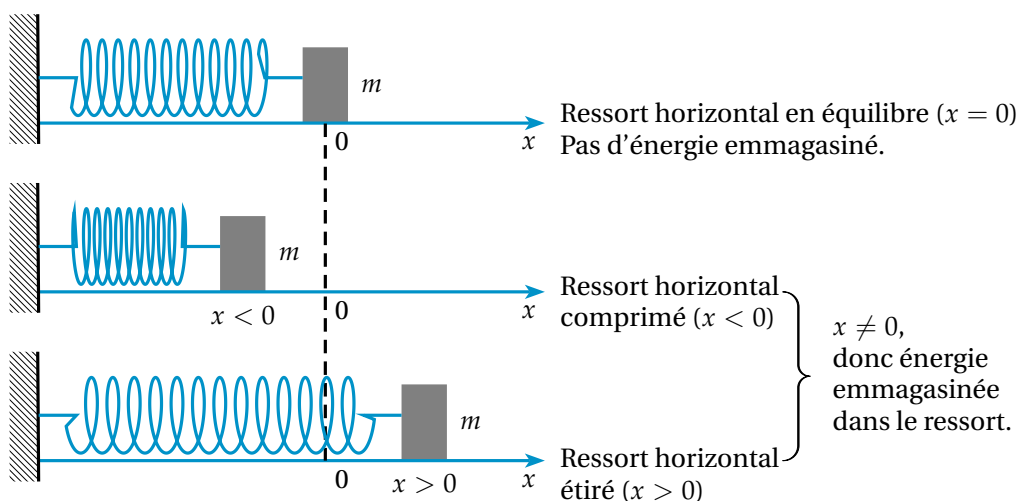
$$E_m = E_c + E_{pp} = \text{constante}$$

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

## 1.2 Pendule élastique (ressort horizontal)

Un pendule élastique est composé d'un objet de masse  $m$  accroché à l'extrémité d'un ressort de constante de raideur  $k$ .

La position de l'objet est repérée par l'abscisse  $x$  du ressort. En position d'équilibre, lorsque le ressort n'est ni étiré ni comprimé, son abscisse est nulle, il est en équilibre.



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

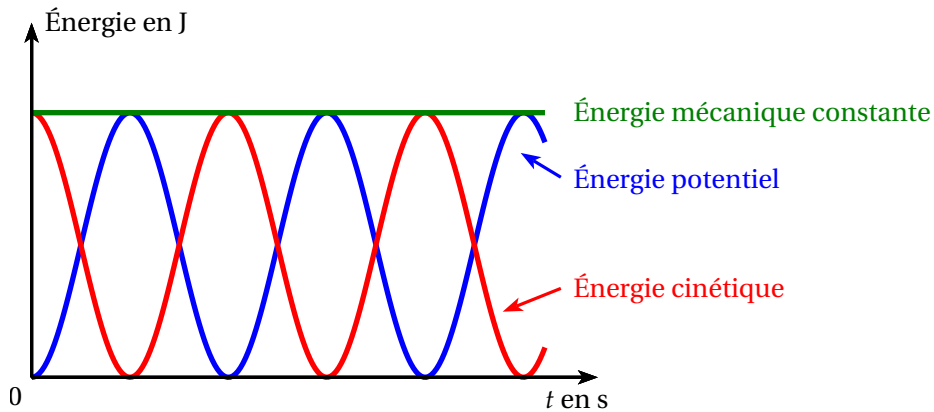
$$E_{pé} = \frac{1}{2}kx^2$$

où  $k$  est la constante de raideur du ressort.

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

$$E_m = E_c + E_{pé} = \text{constante}$$

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



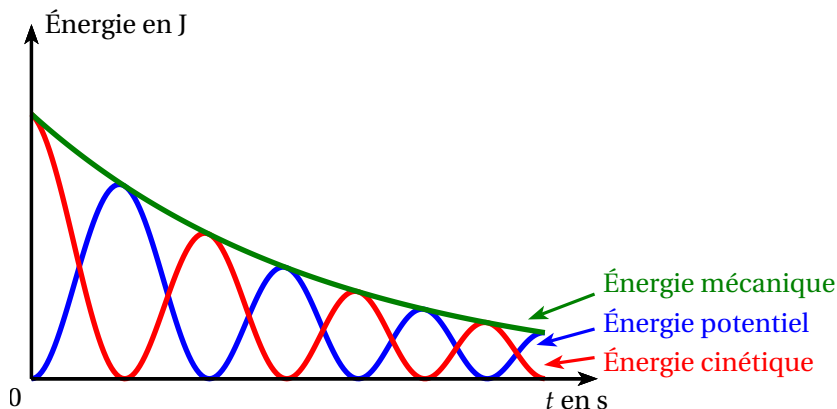
Énergie potentielle, cinétique et mécanique d'un pendule simple ou d'un pendule élastique en **absence** de frottements

### 1.3 Dissipation d'énergie

Lorsque la force des frottements n'est pas négligeable même si elle est faible, elle entraîne un amortissement des oscillations du pendule au bout d'un temps assez long.

La force des frottements est une force non conservative donc 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 présentées sur la figure ci-dessous.



L'énergie mécanique en **présence de frottements** n'est plus constante car il y a perte d'énergie sous forme de chaleur

Il est possible de déterminer le travail des forces de frottements entre deux dates : il est égal à la variation de l'énergie mécanique.

---

## 2 Mesure du temps

La seconde (s) est l'unité de mesure d'une durée dans le Système international. C'est une grandeur de référence qui doit être précise, reproductible, donc immuable.

### 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 des oscillations de petite abscisse angulaire, la période  $T$  d'un pendule simple de longueur  $\ell$  est :

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

où  $g$  est la valeur du champ de pesanteur.

Elle est indépendante de la masse du pendule.

#### 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 :

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

### 2.2 La mesure de la seconde avec des horloges mécaniques

---

Depuis l'antiquité les hommes ont cherché à mesurer le temps en se servant des phénomènes naturels comme la rotation de la terre autour du soleil ou de la lune autour de la terre.

Pour mesurer des durées plus petites, ils ont cherché par la suite à réaliser des instruments plus précis et ils ont ainsi mis en place des dispositifs mécaniques plus perfectionnés en utilisant 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.

Mais 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. 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 La mesure de la seconde avec des horloges atomiques

---

Un atome peut exister sous différents niveaux d'énergie. Selon la nature de l'atome, l'énergie de chacun de ses niveaux ne peut prendre que certaines valeurs bien déterminées. Pour passer d'un niveau d'énergie d'une certaine valeur à un autre niveau d'énergie de valeur différente l'atome reçoit ou émet un photon (onde électromagnétique) dont l'énergie est égale à la différence des énergie des niveaux de l'atome.

Comme l'énergie d'une onde électromagnétique dépend de sa fréquence (et donc de sa période) il faut pour cela que la fréquence  $\nu$  de la radiation associée corresponde exactement à une transition énergétique  $\Delta E$  possible de cet atome telle que  $\Delta E = h\nu$ .

Une horloge atomique utilise la période de cette onde électromagnétique.

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.

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 à l'état naturel il n'existe qu'un seul isotope du césium. La fréquence du rayonnement échangé entre deux niveaux particuliers est toujours la même.

Il est donc judicieux d'utiliser des horloges atomiques pour mesurer le temps car ils nous permettent d'obtenir un oscillateur stable de très courte période et sans perte d'énergie.

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

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