

Chapitre 9 : Comment exploiter des phénomènes périodiques pour accéder à la mesure du temps ?

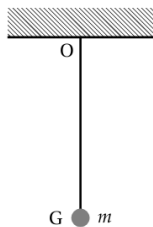
I. Les oscillateurs mécaniques.

On appelle oscillateur (ou système oscillant) un système pouvant évoluer, du fait de ses caractéristiques propres, de façon périodique et alternative autour d'une position d'équilibre. Un système oscillant est donc caractérisé par sa période ou pseudo-période.

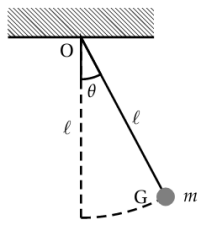
1) Le pendule simple (pendule pesant)

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 ℓ très supérieure aux dimensions du solide.

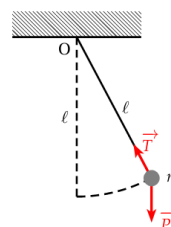
À l'équilibre, le fil est vertical. La position de G en mouvement est repérée par l'angle θ entre le fil et sa position d'équilibre (écart ou abscisse angulaire).



Pendule simple en position d'équilibre



Pendule simple dont la position est repérée par l'abscisse angulaire θ



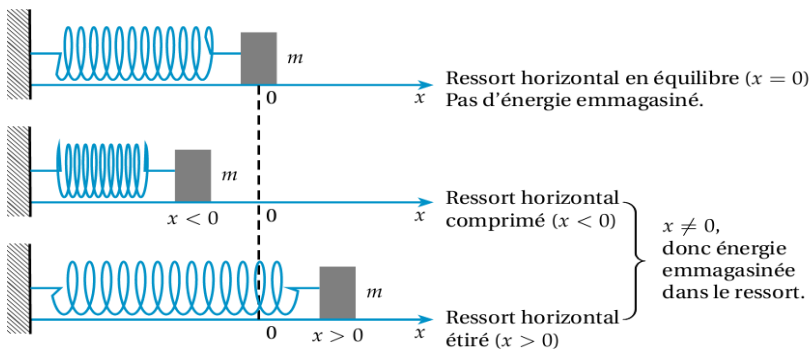
Les forces exercées sur le pendule simple sont la tension du fil $\vec{T}$ et le poids $\vec{P}$ (si on néglige la force de frottement et la poussée d'Archimède)

la période propre du pendule simple a pour expression : $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$.

2) Le pendule élastique.

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.



La période de ce pendule est : $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

II. Quels outils pour réaliser l'étude énergétique d'un système ?

1) Le travail d'une force.

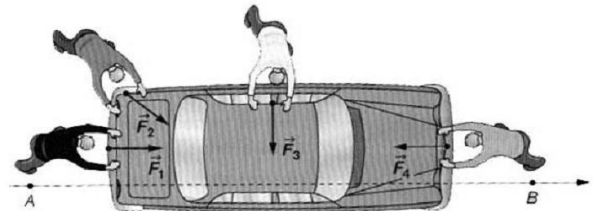
- Établir et exploiter les expressions du travail d'une force constante (force de pesanteur, force électrique dans le cas d'un champ uniforme).
- Établir l'expression du travail d'une force de frottement d'intensité constante dans le cas d'une trajectoire rectiligne.

Les quatre personnes qui poussent une voiture de A et B exerçant des forces de même valeur F mais de directions différentes comme l'indique le schéma, n'ont pas la même efficacité dans leur action pour déplacer la voiture de A à B. On dit que les forces F ne produisent pas le même travail.

Ces constatations ont conduit les physiciens à introduire une nouvelle grandeur appelée travail d'une force.

Un objet soumis à une force qui travaille peut :

- Etre mis en mouvement
- Changer d'altitude
- Se déformer (temporairement ou définitivement)
- Voir sa température s'élever



Dans quelle condition une force produit-elle un travail ?

Considérons la force de poussée du réacteur appliqué à la fusée.	Considérons la force poids de Milou appliquée à « Milou ».	considérons la force de réaction du sol appliqué au système « fusée ».
		
La force de poussée permet à la fusée de se déplacer : elle produit un travail moteur.	Le poids de Milou empêche en partie sa montée : la force poids produit un travail résistif.	La réaction du sol permet à la fusée d'être en équilibre. Elle ne produit pas de travail.

Il faut que le point d'application de la force se déplace.

Définition du dictionnaire.

Le **travail d'une** force est l'énergie fournie par cette force lorsque son point d'application se déplace (l'objet subissant la force se déplace ou se déforme). Le travail est exprimé en joules (J), et est souvent noté W , initiale du mot anglais *Work* qui signifie *travail*.

Définition du travail d'une force constante lors d'un déplacement.

Une force est dite constante lorsque sa **valeur, son sens et sa direction ne varient pas** au cours du temps.

Le travail d'une force constante $\vec{F}$ pour un déplacement $\vec{AB}$ de son point d'application est le produit scalaire de $\vec{F}$ par $\vec{AB}$. Il est noté :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{AB}(\vec{F}) : \text{travail exprimé en Joules (J).} \\ F : \text{valeur de la force en Newton (N).} \\ AB : \text{longueur du déplacement (m)} \\ \alpha : \text{angle entre } \vec{F} \text{ et } \vec{AB} \text{ (}^\circ \text{ ou rad)} \end{array} \right.$$

<http://gwenaelm.free.fr/2008-9/plugins/iconeframe/993/frame.php?lng=fr>

Selon la valeur de l'angle α , le travail peut être **positif, négatif ou nul**, c'est pour quoi on dit que c'est une grandeur algébrique.

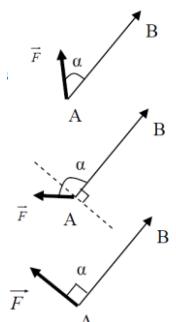
a. Si $\alpha < 90^\circ$ alors $\cos \alpha > 0$ et $W > 0$ (travail positif).

On remarque que la force va favoriser le mouvement dans le sens du déplacement $\vec{AB}$. On dit que le **travail est moteur**.

b. Si $\alpha > 90^\circ$ alors $\cos \alpha < 0$ et $W < 0$ (travail négatif).

La force va alors s'opposer au mouvement du solide, on dit qu'elle effectue un **travail résistant**.

c. Si $\alpha = 90^\circ$ alors $\cos \alpha = 0$ et $W = 0$ (**travail nul**).





2) Exemples de travail d'une force.

Le travail du poids.

Soit un objet de masse m se déplaçant d'un point A à un point B dans un référentiel galiléen.

Le vecteur déplacement a pour expression dans le repère cartésien orthonormé:

$$\vec{AB} = (x_B - x_A) \cdot \vec{i} + (y_B - y_A) \cdot \vec{j}$$

Les coordonnées du vecteur poids sont: $\vec{P} = m \cdot \vec{g} = m \cdot \vec{j}$

$$W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AB} = (-mg \cdot \vec{j}) \cdot [(x_B - x_A) \cdot \vec{i} + (y_B - y_A) \cdot \vec{j}]$$

$$W_{AB}(\vec{P}) = (-mg \cdot \vec{j}) \cdot (x_B - x_A) \cdot \vec{i} + (mg \cdot \vec{j}) \cdot (y_B - y_A) \cdot \vec{j}$$

$$\text{or } \vec{j} \cdot \vec{i} = 1 \times 1 \cdot \cos(\vec{j}, \vec{i}) = 1 \times \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$$

$$\text{et } \vec{j} \cdot \vec{j} = 1 \times 1 \times \cos(\vec{j}, \vec{j}) = 1 \cdot \cos(0) = 1$$

$$W_{AB}(\vec{P}) = -mg \cdot (x_B - x_A) \cdot \vec{j} \cdot \vec{i} - (mg) \cdot (y_B - y_A) \cdot \vec{j} \cdot \vec{j}$$

$$W_{AB}(\vec{P}) = mg \cdot (y_A - y_B)$$

Soit un objet de masse m se déplaçant d'un point A d'altitude y_A à un point B d'altitude y_B dans un référentiel galiléen. Le travail du poids est égal à:

$$W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AB} = mg \cdot (y_A - y_B)$$

Unité: $W_{AB}(\vec{P})$ en joule (J), m (kg), g ($N \cdot kg^{-1}$), y_A et y_B en mètre (m)

Le travail du poids ne dépend pas du chemin suivi mais uniquement de l'altitude initiale et de l'altitude finale: on dit que le poids est **une force conservative**.

Le travail de la force de frottement .

Considérons le cas où un solide est en mouvement rectiligne sur une table. Le solide est soumis à une force de frottement $\vec{f}$ constante appliquée entre les points A et B.

Le travail de cette force entre le point A et B, notée $W_{AB}(\vec{f})$ est égal au produit scalaire du vecteur déplacement par le vecteur force:

$$W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{AB} = f \cdot AB \cdot \cos(\vec{f}, \vec{AB}) = f \cdot AB \cdot \cos(\alpha) = -f \cdot AB$$

Unité : $W_{AB}(\vec{f})$ en joule (J), f en Newton (N), AB en mètre (m).

Le travail d'une force de frottement dépend du chemin suivi: la force de frottement est une **force non conservative**.

3) L'énergie potentielle

Si l'énergie cinétique d'un système est attribuable au mouvement, l'énergie potentielle est attribuable à la position de cet objet.

Pour soulever une gomme du sol jusqu'à une certaine hauteur, il faut soit la ramasser avec la main, soit la projeter avec une énergie cinétique initiale suffisante. Si la gomme revient à son point de départ, elle a la même grandeur de vitesse que lorsqu'elle a été lancée. L'énergie cinétique initiale est en quelque sorte emmagasinée puis restituée à nouveau sous forme d'énergie cinétique. La gomme, lorsqu'elle est à une certaine hauteur, possède donc quelque chose qu'elle n'a pas au sol, l'énergie potentielle.

On peut définir l'énergie potentielle en fonction du travail extérieur. Si l'objet est déplacé à vitesse constante, le travail extérieur accroît l'énergie potentielle.

Le travail du poids, force conservative, est égale à l'opposée de la variation d'énergie potentielle:

$$W_{AB}(\vec{P}) = mg \cdot (z_A - z_B) = -\Delta E_{pp} = m \cdot g \cdot (z_B - z_A)$$

Comme seule la différence d'énergie potentielle intervient, on peut choisir l'endroit où l'énergie potentielle est nulle (par exemple z_A).

L'énergie potentielle d'un objet est égale à l'opposée du travail extérieur fourni à l'objet pour l'amener, à vitesse constante, d'un point de référence à énergie potentielle nulle, au point considéré.



III. Etude énergétique d'un oscillateur mécanique.

- Analyser les transferts énergétiques au cours d'un mouvement d'un point matériel.
- Pratiquer une démarche expérimentale pour étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique d'un oscillateur.
- Extraire et exploiter des informations sur l'influence des phénomènes dissipatifs sur la problématique de la mesure du temps et la définition de la seconde.

1) Définition de l'énergie mécanique : E_m .

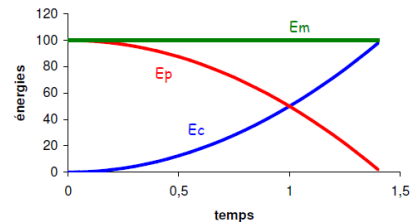
Pour un système indéformable, l'énergie mécanique est définie comme la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique : $E_m = E_c + E_{pp}$

2) Etude d'un oscillateur non-amorti.

Le pendule pesant.

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

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



Dans le cas d'un système isolé, l'énergie mécanique se conserve. Lors du mouvement, la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle de pesanteur reste constante : $\frac{1}{2} m v_G^2 + m g z = \text{cte}$
Il y a transformation d'une énergie en une autre.

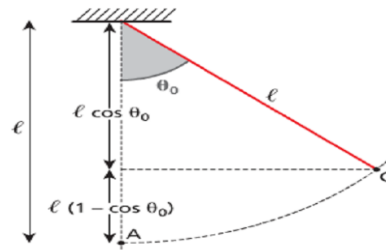
Pour un système "solide + terre" dont l'énergie mécanique se conserve, lorsque la vitesse augmente, son énergie cinétique augmente au profit de l'énergie potentielle et inversement.

Il y a un transfert de l'énergie cinétique en énergie potentielle et réciproquement : $\Delta E_{c \text{ i-f}} = - \Delta E_{p \text{ i-f}}$

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

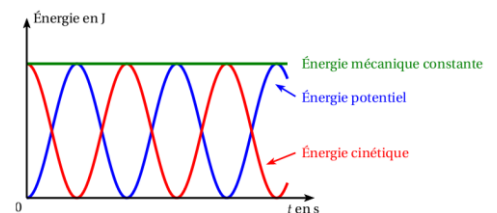


Le pendule élastique.

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

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

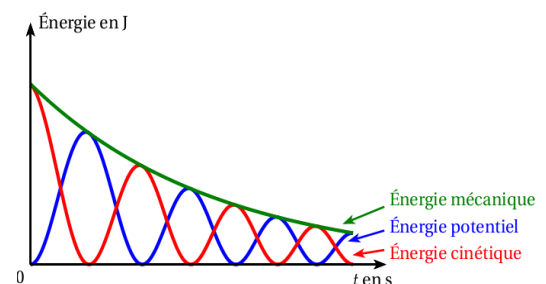
L'énergie cinétique se transforme en énergie potentielle de pesanteur, et réciproquement, l'énergie potentielle de la pesanteur se transforme en énergie cinétique, au cours du mouvement.



3) Etude d'un oscillateur amorti.

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



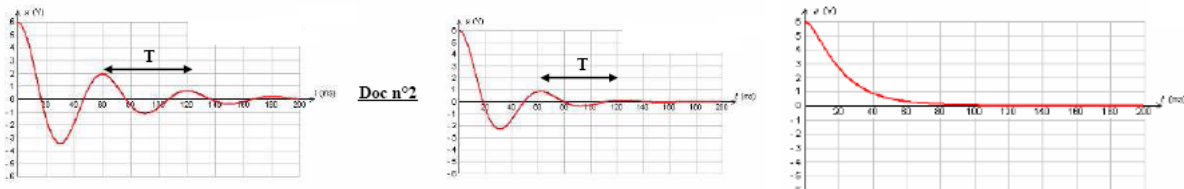
L'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique au cours du temps ont alors les allures présentées sur la figure.

Pour un système " solide + terre " dont l'énergie mécanique ne se conserve pas, la variation d'énergie mécanique correspond au travail des forces extérieur au système. $\Delta E_{m \text{ i-f}} = W \vec{F}_{\text{i-f}}$

4) Exemple d'amortissement.

Certains oscillateurs subissent à cause des frottements un amortissement.

On observe un régime pseudopériodique lorsque l'amortissement est faible, ou un régime apériodique.



IV. La mesure du temps

- Extraire et exploiter des informations pour justifier l'utilisation des horloges atomiques dans la 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.

1) Oscillateurs et mesure du temps.

Voir §1.

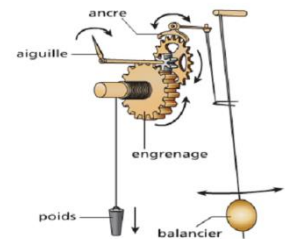
2) La mesure de la seconde avec des horloges mécaniques.

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.



Principe de fonctionnement d'une horloge mécanique à balancier.

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 énergies 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 ν de la radiation associée corresponde exactement à une transition énergétique ΔE 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.