

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

L'énergie et la quantité de mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et le travail

- Le travail d'une force constante
- Le travail effectué par un ressort
- La puissance

L'énergie potentielle et les transformations d'énergie

- Les forces conservatives et les forces non conservatives
- L'énergie mécanique
- La variation de l'énergie mécanique
- L'énergie thermique
- La chaleur

L'énergie cinétique et le travail

- Le travail d'une force
constante
- Le travail effectué par un
ressort
- La puissance

L'énergie potentielle et les transformations d'énergie

- Les forces conservatives et
les forces non conservatives
- L'énergie mécanique
- La variation de l'énergie
mécanique
- L'énergie thermique
- La chaleur

Introduction

L'énergie est une quantité abstraite, difficile à définir de façon simple. De façon vague, on peut dire que l'énergie est une quantité scalaire qui décrit l'état d'un système. Il existe plusieurs types d'énergie, notamment l'énergie cinétique (liée au mouvement), l'énergie potentielle (liée à la position relative des éléments d'un système), l'énergie électrique, l'énergie lumineuse ou l'énergie chimique.

L'énergie et la
quantité de
mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

- ▶ L'importance de vient du principe suivant: l'énergie est une grandeur physique qui se conserve. Si un système est isolé (sans interaction avec son environnement), son énergie ne varie pas; l'énergie peut être transformée d'une forme à une autre, mais la somme de tous les types d'énergie ne varie pas.
- ▶ Si un système n'est pas isolé, son énergie augmente (ou diminue) si l'énergie de l'environnement diminue (ou augmente). L'énergie peut être transférée de l'environnement vers le système (ou du système vers l'environnement).
- ▶ Le principe de conservation de l'énergie est l'un des principes les plus importants en physique et en sciences en général. Nous allons le considérer comme un fait expérimental, sans essayer de le démontrer; même si notre étude se limite à la mécanique newtonienne, son champ d'application dépasse celui des lois de Newton.

L'énergie cinétique et
le travailLe travail d'une force
constanteLe travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergieLes forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

Conservation de l'énergie

- ▶ L'énergie est une grandeur physique qui se conserve.
- ▶ L'énergie d'un système isolé demeure constante.
- ▶ Lorsqu'un système est en interaction, son énergie augmente si l'environnement lui en donne, et son énergie diminue si le système en cède à l'environnement.

**L'énergie cinétique et
le travail**Le travail d'une force
constanteLe travail effectué par un
ressort

La puissance

**L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie**Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

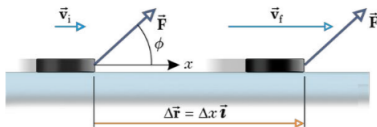
La chaleur

Objectif

Étudier la variation de l'énergie d'un objet produite par une force extérieure en utilisant la quantité de mouvement.

Définition (Travail)

Un travail W est un transfert d'énergie, d'un agent vers un objet, au moyen d'une force. Le travail est positif lorsque l'énergie est reçue par l'objet, et le travail est négatif lorsque l'énergie est cédée par l'objet.



L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

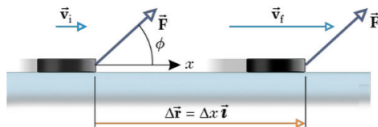
Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur



Si $\mathbf{F} = m(a_x, a_y, 0)$ est constant et le déplacement est définie en utilisant $\mathbf{r}(t_0) = (r_x(t_0), r_y(t_0), 0)$ et $\mathbf{r}(t_0 + \Delta t) = (r_x(t_0 + \Delta t), r_y(t_0 + \Delta t), 0)$. On peut obtenir

$$r_x(t_0 + \Delta t) = r_x(t_0) + v_x(t_0) \Delta t + \frac{a_x}{2} \Delta t^2,$$

$$r_y(t_0 + \Delta t) = r_y(t_0) + v_y(t_0) \Delta t + \frac{a_y}{2} \Delta t^2,$$

avec

$$\Delta t = \frac{v_x(t_0 + \Delta t) - v_x(t_0)}{a_x} = \frac{v_y(t_0 + \Delta t) - v_y(t_0)}{a_y}.$$

L'énergie et la quantité de mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et le travail

Le travail d'une force constante

Le travail effectué par un ressort

La puissance

L'énergie potentielle et les transformations d'énergie

Les forces conservatives et les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

L'énergie cinétique et
le travailLe travail d'une force
constanteLe travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergieLes forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

$$\frac{r_x(t_0 + \Delta t) - r_x(t_0)}{\Delta t} = v_x(t_0) + \frac{a_x}{2} \Delta t,$$

$$\frac{r_y(t_0 + \Delta t) - r_y(t_0)}{\Delta t} = v_y(t_0) + \frac{a_y}{2} \Delta t,$$

$$a_x \frac{r_x(t_0 + \Delta t) - r_x(t_0)}{v_x(t_0 + \Delta t) - v_x(t_0)} = v_x(t_0) + \frac{a_x}{2} \frac{v_x(t_0 + \Delta t) - v_x(t_0)}{a_x},$$

$$a_y \frac{r_y(t_0 + \Delta t) - r_y(t_0)}{v_y(t_0 + \Delta t) - v_y(t_0)} = v_y(t_0) + \frac{a_y}{2} \frac{v_y(t_0 + \Delta t) - v_y(t_0)}{a_y},$$

$$a_x \frac{r_x(t_0 + \Delta t) - r_x(t_0)}{v_x(t_0 + \Delta t) - v_x(t_0)} = \frac{1}{2}(v_x(t_0 + \Delta t) + v_x(t_0)),$$

$$a_y \frac{r_y(t_0 + \Delta t) - r_y(t_0)}{v_y(t_0 + \Delta t) - v_y(t_0)} = \frac{1}{2}(v_y(t_0 + \Delta t) + v_y(t_0)),$$

L'énergie cinétique et
le travailLe travail d'une force
constanteLe travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergieLes forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

$$a_x (r_x(t_0 + \Delta t) - r_x(t_0)) = \\ \frac{1}{2}(v_x(t_0 + \Delta t) + v_x(t_0))(v_x(t_0 + \Delta t) - v_x(t_0)),$$

$$a_y (r_y(t_0 + \Delta t) - r_y(t_0)) = \\ \frac{1}{2}(v_y(t_0 + \Delta t) + v_y(t_0))(v_y(t_0 + \Delta t) - v_y(t_0)),$$

$$a_x (r_x(t_0 + \Delta t) - r_x(t_0)) = \frac{1}{2}(v_x(t_0 + \Delta t)^2 - v_x(t_0)^2),$$

$$a_y (r_y(t_0 + \Delta t) - r_y(t_0)) = \frac{1}{2}(v_y(t_0 + \Delta t)^2 - v_y(t_0)^2)$$

Si on multiplie par la masse m ,

$$m a_x (r_x(t_0 + \Delta t) - r_x(t_0)) = \frac{1}{2}(m v_x(t_0 + \Delta t)^2 - m v_x(t_0)^2),$$

$$m a_y (r_y(t_0 + \Delta t) - r_y(t_0)) = \frac{1}{2}(m v_y(t_0 + \Delta t)^2 - m v_y(t_0)^2)$$

$$F_x (r_x(t_0 + \Delta t) - r_x(t_0)) = \frac{1}{2}(m v_x(t_0 + \Delta t)^2 - m v_x(t_0)^2),$$

$$F_y (r_y(t_0 + \Delta t) - r_y(t_0)) = \frac{1}{2}(m v_y(t_0 + \Delta t)^2 - m v_y(t_0)^2)$$

Les quantités à gauche

$$F_x (r_x(t_0 + \Delta t) - r_x(t_0))$$

$$F_y (r_y(t_0 + \Delta t) - r_y(t_0))$$

sont force multiplié par le déplacement pour chaque coordonnée,
c'est qu'on connaît comme travail.

Les quantités à droite

$$\frac{1}{2} m v_x(t_0 + \Delta t)^2 - \frac{1}{2} m v_x(t_0)^2,$$

$$\frac{1}{2} m v_y(t_0 + \Delta t)^2 - \frac{1}{2} m v_y(t_0)^2,$$

c'est qu'on appelle la variation d'énergie cinétique. Si on prend la somme de

$$F_x(r_x(t_0 + \Delta t) - r_x(t_0)) = \frac{1}{2} m v_x(t_0 + \Delta t)^2 - \frac{1}{2} m v_x(t_0)^2 \quad ,$$

$$F_y(r_y(t_0 + \Delta t) - r_y(t_0)) = \frac{1}{2} m v_y(t_0 + \Delta t)^2 - \frac{1}{2} m v_y(t_0)^2,$$

on obtient

$$F_x(r_x(t_0 + \Delta t) - r_x(t_0)) + F_y(r_y(t_0 + \Delta t) - r_y(t_0)) =$$

$$\langle \mathbf{F}, \mathbf{r}(t_0 + \Delta t) - \mathbf{r}(t_0) \rangle = \frac{1}{2} m \|\mathbf{v}(t_0 + \Delta t)\|^2 - \frac{1}{2} m \|\mathbf{v}(t_0)\|^2$$

$$\frac{1}{2} m v_x(t_0 + \Delta t)^2 - \frac{1}{2} m v_x(t_0)^2 +$$

$$\frac{1}{2} m v_y(t_0 + \Delta t)^2 - \frac{1}{2} m v_y(t_0)^2$$

L'énergie et la
quantité de
mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

Théorème (théorème de l'énergie cinétique)

Si une force constante \mathbf{F} agit sur un objet au moyen d'une force constante, le travail

$$\begin{aligned} W(\Delta t) &= \langle \mathbf{F}, \mathbf{r}(t_0 + \Delta t) - \mathbf{r}(t_0) \rangle \\ &= \frac{1}{2} m \|\mathbf{v}(t_0 + \Delta t)\|^2 - \frac{1}{2} m \|\mathbf{v}(t_0)\|^2. \end{aligned}$$

pour tout $\Delta t \geq 0$.

Définition

On dit que l'énergie cinétique $K(t_0)$ d'un objet au temps t_0 avec une quantité du mouvement $\mathbf{p}(t_0) = m \mathbf{v}(t_0)$ est égal à

$$K(t_0) = \frac{1}{2} m \|\mathbf{v}(t_0)\|^2 = \frac{1}{2} m \langle \mathbf{v}(t_0), \mathbf{v}(t_0) \rangle.$$

En conséquence $W(\Delta t) = K(t_0 + \Delta t) - K(t_0) := \Delta K(t_0)$.

L'énergie cinétique et le travail

Le travail d'une force constante

Le travail effectué par un ressort

La puissance

L'énergie potentielle et les transformations d'énergie

Les forces conservatives et les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

Problème

Un traîneau à chiens, avec le musher et un passager, a une masse de 145 kg. Il est tiré par des chiens au moyen de deux câbles.

Chaque câble exerce une force de tension de 200 N orientée à 5° par rapport à l'horizontale. Le coefficient de frottement cinétique entre la neige et le traîneau est de 0.200.

1. Calculez le travail effectué lorsque le traîneau se déplace de 25 m.
2. Si le traîneau est initialement immobile, quel est le module de sa vitesse après 25 m?

On connaît $m = 145$ kg, la tension d'un câble est

$$\mathbf{T} = (200 \cos 5^\circ, 200 \sin 5^\circ),$$

$\mu_c = 0.2$. La force de frottement cinétique est

$$f_c = \mu_c \cdot N = \mu_c \cdot (m \cdot g - (200 \sin 5^\circ + 200 \sin 5^\circ)) = 286.51 \text{ N}.$$

La force résultante est

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= (\mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2) - (f_c, 0) \\ &= 2 \cdot (200 \cos 5^\circ, 200 \sin 5^\circ) - (286.51, 0) \\ &= (398.47, 34.86) - (286.51, 0) = (111.96, 34.86)\end{aligned}$$

Le déplacement es

$$\mathbf{r}(t_0 + \Delta t) - \mathbf{r}(t_0) = (25, 0) \text{ m.}$$

Alors, le travail effectué lorsque le traîneau se déplace de 25 m est

$$\begin{aligned}W &= \langle (111.96, 34.86), (25, 0) \rangle = 111.96 \cdot 25 + 34.86 \cdot 0 \\ &= 111.96 \cdot 25 = 2799.19 \text{ J} \approx 3 \text{ kJ.} \\ &= \frac{1}{2} m \|\mathbf{v}(t_0 + \Delta t)\|^2 - \frac{1}{2} m \|\mathbf{v}(t_0)\|^2\end{aligned}$$

Si $\|\mathbf{v}(t_0)\| = 0 \text{ m/s}$ alors $2799.19 = \frac{1}{2} m \|\mathbf{v}(t_0 + \Delta t)\|^2$ implique

$$\|\mathbf{v}(t_0 + \Delta t)\| = \sqrt{\frac{2 \cdot 2799.19}{145}} = 6.43 \text{ m/s.}$$

L'énergie et la
quantité de
mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

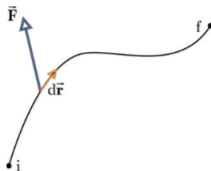
La chaleur

Le travail d'une force variable

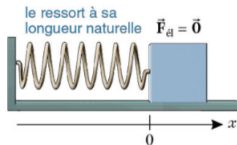
Définition

Si la force est dépendent du temps $\mathbf{F}(t)$ et $\mathbf{r}(t)$ et la position de l'objet au temps t . Alors le travail est définie par l'intégrale:

$$W(\Delta t) = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \langle \mathbf{F}(t), d\mathbf{r}(t) \rangle.$$



La loi de Hooke



La figure illustre un bloc attaché à un ressort qui n'est ni étiré ni comprimé. Le ressort a sa longueur naturelle. Il exerce une force nulle sur le bloc.

L'énergie et la
quantité de
mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

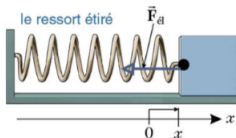
L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

La loi de Hooke



Lorsque le ressort est étiré jusqu'à une position x . l'étirement est $\Delta L = x$. la force exercée par le ressort a un module

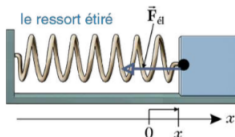
$$k\Delta L = kx$$

et elle est orientée vers la gauche. Donc

$$\mathbf{F}_{\text{el}} = \mathbf{F}_{\text{el}}(x) = (-kx, 0, 0).$$

la force élastique dépend de la position.

La loi de Hooke



Concernant la position $\mathbf{r}(x) = (x, 0, 0)$ et $d\mathbf{r} = (dx, 0, 0)$. Alors

$$\begin{aligned}
 W(\Delta t) &= \int_{x_i}^{x_f} \langle \mathbf{F}_{\text{el}}, d\mathbf{r} \rangle \\
 &= \int_{x_i}^{x_f} \langle (-kx, 0, 0), (dx, 0, 0) \rangle = \int_{x_i}^{x_f} -kx \, dx \\
 &= -\frac{1}{2} kx^2 \Big|_{x_i}^{x_f} = -\frac{1}{2} k(x_f^2 - x_i^2).
 \end{aligned}$$

L'énergie et la
quantité de
mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

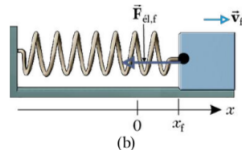
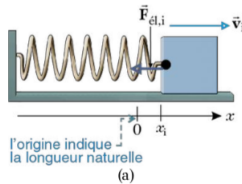
La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

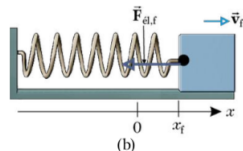
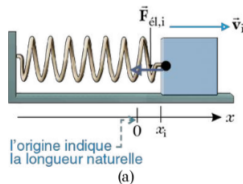
La chaleur

Le travail de la force élastique

- Supposons qu'un bloc est attaché à un ressort.
- À la suite d'une poussée extérieure brève, le bloc se déplace à une vitesse v_i lorsque le ressort est étiré jusqu'à x_i .
- Le bloc continue son mouvement; quand l'étirement du ressort est x_f , le bloc se déplace à une vitesse v_f . Le ressort ralentit le bloc en effectuant un travail.



Le travail de la force élastique



$$W(\Delta t) = -\frac{1}{2}k(x_f^2 - x_i^2) = -\frac{1}{2}k(x_f + x_i)(x_f - x_i).$$

L'énergie et la
quantité de
mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

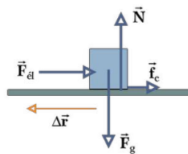
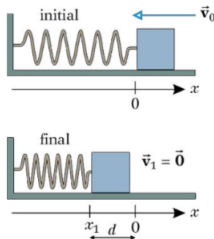
L'énergie thermique

La chaleur

Problème (TP)

Une caisse de 200 kg glisse sur un plancher horizontal dont le coefficient de frottement cinétique est de 0.30. Lorsque la caisse a une vitesse de 2.70 m/s vers la gauche, elle entre en contact avec un ressort initialement à sa longueur naturelle. La constante de rappel du ressort k est de 600 N/m.

1. Quelle est la compression maximale du ressort?
2. Quelle est la vitesse de la caisse lorsque le ressort revient à sa position naturelle et que la caisse n'a plus de contact avec le ressort?



Le travail représente un transfert d'énergie de l'environnement vers un objet. Ce transfert peut se faire rapidement ou lentement selon la situation. Lorsqu'on veut connaître la rapidité du transfert de l'énergie, on calcule la puissance de la force, c'est-à-dire le taux de transfert d'énergie.

Définition (Puissance moyenne)

Soit une force qui effectue un travail $W(\Delta t)$ sur un objet (ce qui change l'énergie de l'objet de $\Delta E := W(\Delta t)$) durant un intervalle de temps Δt . La puissance moyenne est

$$P(\Delta t) = \frac{W(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

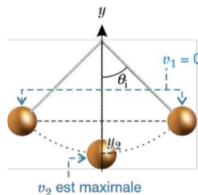
Dans le SI, la puissance est mesurée en watts (W), en l'honneur de l'ingénieur écossais James Watt (1736-1819). Watt a amélioré grandement la machine à vapeur, un élément essentiel de la révolution industrielle. Selon la définition de la puissance, 1 W représente la puissance d'une force qui a besoin de 1 s pour effectuer un travail de 1 J.

Définition (Puissance instantané)

Soit une force exercé entre t et $t + \Delta t$ et qui effectue un travail $W(\Delta t)$ sur un objet (ce qui change l'énergie de l'objet de $\Delta E(t) := W(\Delta t)$) durant un intervalle de temps Δt . La puissance instantané à t est

$$P(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} P(\Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{d}{dt} W(t) = \frac{d}{dt} E(t).$$

L'énergie potentielle gravitationnelle



On déplace le pendule d'un angle θ_i et on le laisse aller. Le pendule se met à osciller, c'est-à-dire que son mouvement est un va-et-vient autour de la position la plus basse. Si la résistance de l'air est négligeable, le pendule va monter de chaque côté à la même hauteur y . À cette position, la vitesse est nulle, et le pendule n'a pas d'énergie cinétique. Par contre, lorsque la corde est verticale, le module de la vitesse et l'énergie cinétique sont maximaux.

L'énergie et la
quantité de
mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

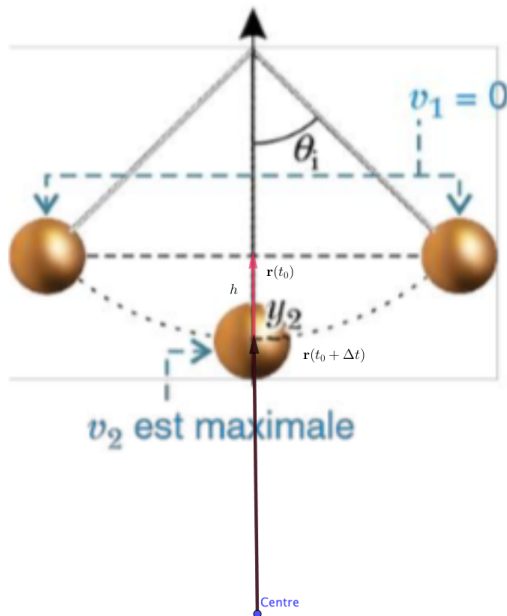
Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur



L'énergie et la quantité de mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et le travail

Le travail d'une force constante

Le travail effectué par un ressort

La puissance

L'énergie potentielle et les transformations d'énergie

Les forces conservatives et les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

“Élasticité gravitationnelle”

La lois de gravitation universelle de Newton au temps t_0 :

$$\mathbf{F}_{M \rightarrow m} = -G \frac{m \cdot M}{\|\mathbf{r}(t_0)\|^2} \frac{\mathbf{r}(t_0)}{\|\mathbf{r}(t_0)\|}$$

nous décrivons une force de M (masse de la terre) sur m (masse d'un objet sous la terre) perpendiculaire à la surface de la terre. On peut supposer que $\|\mathbf{r}(t_0)\| \approx \|\mathbf{r}(t_0 + \Delta t)\|$ alors

$$-G \frac{m \cdot M}{\|\mathbf{r}(t_0)\|^2} \approx -G \frac{m \cdot M}{\|\mathbf{r}(t_0 + \Delta t)\|^2}$$

pour $\Delta t \approx 0$ ce qui implique qu'on peut considérer une force constante $\mathbf{F}_{M \rightarrow m}$. Si on fait un déplacement vertical de hauteur h :

$$\mathbf{r}(t_0 + \Delta t) - \mathbf{r}(t_0) = h \frac{\mathbf{r}(t_0)}{\|\mathbf{r}(t_0)\|}$$

“Élasticité gravitationnelle”

Le travail $W(\Delta t) = \Delta E$ effectué (variation de l'énergie) est

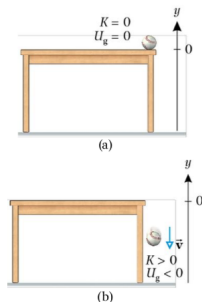
$$\begin{aligned}
 W(\Delta t) &= \langle \mathbf{F}_{M \rightarrow m}, \mathbf{r}(t_0 + \Delta t) - \mathbf{r}(t_0) \rangle \\
 &= \left\langle -G \frac{m \cdot M}{\|\mathbf{r}(t_0)\|^2} \frac{\mathbf{r}(t_0)}{\|\mathbf{r}(t_0)\|}, h \frac{\mathbf{r}(t_0)}{\|\mathbf{r}(t_0)\|} \right\rangle \\
 &= -G \frac{m \cdot M}{\|\mathbf{r}(t_0)\|^2} h \left\langle \frac{\mathbf{r}(t_0)}{\|\mathbf{r}(t_0)\|}, \frac{\mathbf{r}(t_0)}{\|\mathbf{r}(t_0)\|} \right\rangle \\
 &= -m \cdot \left(G \frac{M}{\|\mathbf{r}(t_0)\|^2} \right) \cdot h \cdot 1 \\
 &= -m \cdot g \cdot h,
 \end{aligned}$$

qui coïncide avec l'expression habituelle de l'énergie potentiel.

$$\left\langle \frac{\mathbf{r}(t_0)}{\|\mathbf{r}(t_0)\|}, \frac{\mathbf{r}(t_0)}{\|\mathbf{r}(t_0)\|} \right\rangle = \left\| \frac{\mathbf{r}(t_0)}{\|\mathbf{r}(t_0)\|} \right\|^2 = 1.$$

Le point de référence

Pour calculer l'énergie potentielle d'un système, on a besoin de la position verticale y de l'objet par rapport à la Terre. Dans la explication précédent on utilise implicitement un axe des y vertical orienté vers le haut. Par contre, l'origine peut être placée à une position arbitraire au début du problème.



Définition (Énergie Potentielle)

on dit que son énergie potentielle est

$$U(t_0) = m \cdot g \cdot y(t_0)$$

Théorème (théorème de l'énergie potentielle)

Le travail d'un objet de masse m placée à une coordonnée $y(t_0)$ par rapport à une origine fixée au temps t_0 , que est déplacé par la vertical a un position $y(t_0 + \Delta t)$ effectue une travail:

$$\begin{aligned} W(\Delta t) &= m \cdot g \cdot y(t_0 + \Delta t) - m \cdot g \cdot y(t_0) \\ &= U(t_0 + \Delta t) - U(t_0) := \Delta U(t_0) \\ &= m \cdot g \cdot (y(t_0 + \Delta t) - y(t_0)) \end{aligned}$$

pour tout $\Delta t \geq 0$.

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

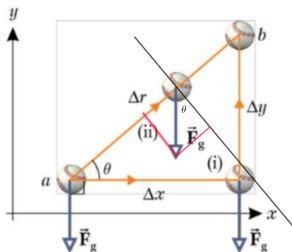
La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

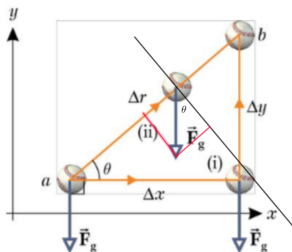
La chaleur

Remarque

La force gravitationnelle a une caractéristique spéciale. Le travail de cette force sur un objet ne dépend pas de la trajectoire, mais seulement du point initial et du point final de cette trajectoire.



- La force pour le chemin (i) pour aller de (a) à (b) est $\mathbf{F}_{(i)} = (0, -mg)$.
- La force pour le chemin (ii) pour aller de (a) à (b) est $\mathbf{F}_{(ii)} = (-mg \sin \theta, -mg \cos \theta)$.



L'énergie et la quantité de mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et le travail

Le travail d'une force constante

Le travail effectué par un ressort

La puissance

L'énergie potentielle et les transformations d'énergie

Les forces conservatives et les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

- Le travail pour le chemin (i) pour aller de (a) à (b) est

$$\begin{aligned} W_{(i)} &= \langle (0, -mg), (\Delta x, 0) \rangle + \langle (0, -mg), (0, \Delta y) \rangle \\ &= -mg \Delta y. \end{aligned}$$

- La travail pour le chemin (ii) pour aller de (a) à (b) est

$$\begin{aligned} W_{(ii)} &= \langle (-mg \sin \theta, -mg \cos \theta), (\Delta r, 0) \rangle \\ &= -mg \sin \theta \Delta r = -mg \frac{\Delta y}{\Delta r} \Delta r. \end{aligned}$$

Forces conservatives

Définition (Force conservative)

Le travail effectué par une force conservative sur un objet ne dépend pas de la trajectoire de cet objet, mais seulement des points initial et final de cette trajectoire.

Propriété

Le travail effectué par une force conservative sur un objet est nul lorsque la trajectoire est fermée.

Remarque

La plupart des forces sont des forces non conservatives, car le travail dépend de la trajectoire de la particule. C'est le cas de la force de tension d'une corde, de la force de frottement cinétique, de la traînée, de la force de traction ou de poussée faite par une personne.

L'énergie et la
quantité de
mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

La détermination de l'énergie potentielle

En absence d'énergie potentielle, on a en utilisant le théorème de l'énergie cinétique que le travail est

$$W(\Delta t) = K(t_0 + \Delta t) - K(t_0) = \Delta K$$

Dans un système en présence de d'énergie potentielle, l'énergie total de système est la somme de la variation d'énergie cinétique plus la variation d'énergie potentielle

$$\Delta E_{\text{total}} = \Delta K + \Delta U.$$

Si le système est conservative l'énergie total de système est nulle: $\Delta E_{\text{total}} = 0$, donc on se vérifie

$$\Delta U = -\Delta K.$$

Théorème

Dans un système conservative $\Delta U = -W(\Delta t)$.

L'énergie et la
quantité de
mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

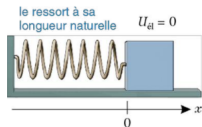
L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

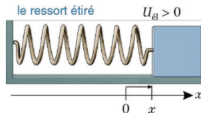
L'énergie thermique

La chaleur

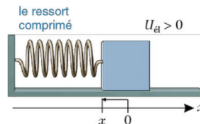
L'énergie potentielle élastique



(a)



(b)



(c)

Le travail effectué par le ressort entre x_i et x_f est

$$W(\Delta t) = -\frac{1}{2}k(x_f^2 - x_i^2) = -\frac{1}{2}k(x_f + x_i)(x_f - x_i).$$

En conséquence, si on prend $x_i = 0$ et $x_f = x$ on obtient que l'énergie potentielle élastique est toujours non négative:

$$U_{\text{élastique}}(x) = -W(\Delta t) = \frac{1}{2}k x^2.$$

L'énergie et la
quantité de
mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

Définition

On définit l'énergie mécanique du système comme la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle:

$$E_{\text{méc}}(t_0) = K(t_0) + U(t_0).$$

Théorème (Principe de conservation de l'énergie)

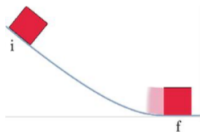
L'énergie mécanique d'un système est constante lorsque ce système est isolé et que les forces internes sont seulement des forces conservatives. L'énergie cinétique se transforme en énergie potentielle et inversement, c'est-à-dire

$$E_{\text{méc}}(t_0) = E_{\text{méc}}(t_0 + \Delta t)$$

pour tout $\Delta t \geq 0$. Il est équivalent à

$$K(t_0) + U(t_0) = K(t_0 + \Delta t) + U(t_0 + \Delta t) \Leftrightarrow \Delta K = -\Delta U.$$

- ▶ Un bloc glisse vers le bas d'un plan incliné.
- ▶ Le système comprend le bloc et la Terre, mais pas le plan incliné.
- ▶ La force de frottement exercée par la surface du plan sur le bloc effectue un travail extérieur W_{ext} .
- ▶ Quand le bloc glisse vers le bas, une partie de l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique, mais il y a aussi une partie de l'énergie potentielle qui est transférée à la surface.
- ▶ Le travail extérieur change l'énergie mécanique du système.



$$W_{\text{ext}} = \Delta K + \Delta U = \Delta E_{\text{méc.}} \quad (1)$$

L'énergie et la quantité de mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et le travail

Le travail d'une force constante

Le travail effectué par un ressort

La puissance

L'énergie potentielle et les transformations d'énergie

Les forces conservatives et les forces non conservatives

L'énergie mécanique

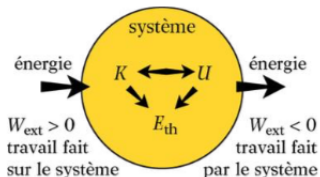
La variation de l'énergie mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

- ▶ S'il y a plusieurs forces extérieures qui effectuent un travail, W_{ext} représente le travail net des forces extérieures.
- ▶ Le système composé du bloc, la surface du plan incliné et de la Terre est isolé: l'énergie du système doit être constante. Cependant, l'énergie cinétique du bloc diminue graduellement. Elle se transforme en un autre type: **l'énergie thermique**.

Variation de l'énergie du système



L'énergie et la quantité de mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et le travail

Le travail d'une force constante

Le travail effectué par un ressort

La puissance

L'énergie potentielle et les transformations d'énergie

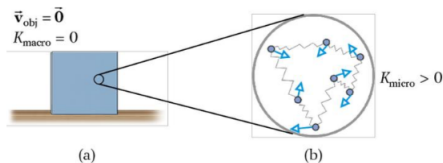
Les forces conservatives et les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie mécanique

L'énergie thermique

La chaleur



- ▶ Au niveau macroscopique, le bloc et la surface ont une énergie cinétique nulle.
- ▶ Si on pouvait voir les molécules, on constaterait que chaque molécule a un mouvement désordonné; certaines se déplacent vers la droite, d'autres vers la gauche; certaines se déplacent vers le haut, d'autres vers le bas. La vitesse v est aléatoire
- ▶ Le mouvement résultant moyenne est nul $v_{\text{obj}} = E[v] = 0$, car il y a autant de molécules qui se déplacent vers la droite que vers la gauche.

L'énergie et la quantité de mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et le travail

Le travail d'une force constante

Le travail effectué par un ressort

La puissance

L'énergie potentielle et les transformations d'énergie

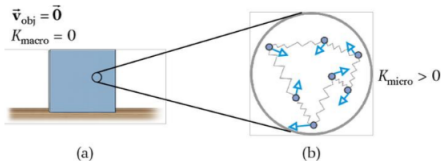
Les forces conservatives et les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie mécanique

L'énergie thermique

La chaleur



- ▶ Les molécules ont une énergie cinétique.
- ▶ Elles ont aussi une énergie potentielle de liaison entre elles.
- ▶ L'énergie thermique représente la somme de cette énergie cinétique et potentielle microscopique:

$$E_{th} = K_{micro} + U_{micro}.$$

- ▶ Selon les résultats de la thermodynamique, l'énergie thermique est proportionnelle à la température du corps, exprimée en kelvins.
- ▶ Plus la température d'un objet est élevée, plus l'énergie thermique associée au mouvement désordonné de ses atomes ou de ses molécules est élevée.

L'énergie et la quantité de mouvement

Antonio Falcó

L'énergie cinétique et le travail

Le travail d'une force constante

Le travail effectué par un ressort

La puissance

L'énergie potentielle et les transformations d'énergie

Les forces conservatives et les forces non conservatives

L'énergie mécanique

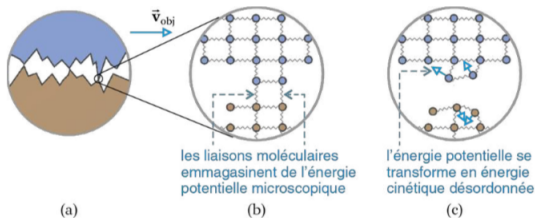
La variation de l'énergie mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

Remarque

L'énergie associée au mouvement désordonné des molécules n'est pas appelée la chaleur, mais bien l'énergie thermique. En physique, le mot chaleur a une définition bien spécifique.



L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

Définition (force dissipative)

La force de frottement cinétique et la traînée sont des forces qui s'opposent toujours au mouvement d'un objet par rapport à un autre. On les appelle des forces dissipatives. Une force dissipative est toujours non conservative. C'est une force qui fait augmenter l'énergie thermique d'un système.

Théorème

Soit un système dans lequel une des forces internes est une force dissipative. Alors l'énergie du système E_{sys} variera si un travail extérieur est effectué sur celui-ci:

$$W_{\text{ext}} = \Delta E_{\text{sys}} = \Delta E_{\text{méc}} + \Delta E_{\text{th}}.$$

L'énergie cinétique et
le travailLe travail d'une force
constanteLe travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergieLes forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur

Définition (chaleur)

La chaleur Q est un transfert d'énergie thermique, entre un objet chaud et un objet froid, qui ne fait pas intervenir un déplacement macroscopique.

- ▶ De la même façon, lorsque vous faites chauffer de l'eau dans une bouilloire, celle-ci transmet de la chaleur à l'eau. L'énergie thermique de l'eau augmente, et on observe une augmentation de la température de l'eau.
- ▶ Il y a donc deux façons de transférer de l'énergie à un système: en effectuant un travail W_{ext} ou en transmettant de la chaleur Q . L'équation générale de la conservation de l'énergie est donc:

$$\Delta E_{\text{sys}} = W_{\text{ext}} + Q$$

Cette équation est connue sous le nom du **premier principe de la thermodynamique**.

- ▶ De façon expérimentale, on remarque que lorsqu'un objet chaud est placé en contact avec un objet froid, la chaleur est transmise de l'objet chaud à l'objet froid mais jamais le contraire, à moins d'effectuer un travail.
- ▶ Pourtant, **le premier principe de la thermodynamique n'indique pas un sens particulier pour l'échange de la chaleur**. Le principe de conservation de l'énergie serait quand même valide si l'objet froid devenait plus froid et que l'objet chaud devenait plus chaud. Il faut introduire un autre principe:

Principe (deuxième principe de la thermodynamique)

Lorsque deux objets sont en contact, la chaleur est transmise de façon spontanée de l'objet chaud vers l'objet froid.

L'énergie cinétique et
le travail

Le travail d'une force
constante

Le travail effectué par un
ressort

La puissance

L'énergie potentielle
et les transformations
d'énergie

Les forces conservatives et
les forces non conservatives

L'énergie mécanique

La variation de l'énergie
mécanique

L'énergie thermique

La chaleur