

Énergie et travail

L'énergie est la grandeur la plus rentable de la physique : en comparant simplement un état initial et un état final, elle permet de prévoir une vitesse, une hauteur atteinte ou une distance d'arrêt, mais aussi de quantifier l'énergie dissipée par les frottements — sans avoir à décrire chaque instant du mouvement. Cette fiche rassemble le socle de première : énergie cinétique, travail d'une force, théorème de l'énergie cinétique, potentielle et mécanique.

1. Le principe de conservation

Conservation de l'énergie

L'**énergie** (en **joules**, J) se présente sous de multiples formes — cinétique, potentielle, thermique, chimique, électrique, nucléaire ... — qui se **convertissent** les unes dans les autres, mais le total se conserve : **l'énergie ne se crée ni ne se détruit, elle se transforme et se transfère.**

$$E_{\text{totale}} = \text{constante}$$

Exemple. Lorsqu'un objet tombe sans frottements, son énergie potentielle de pesanteur diminue tandis que son énergie cinétique augmente d'autant : il perd de l'altitude et gagne de la vitesse, mais son énergie mécanique reste constante. Lors d'un freinage, au contraire, les frottements convertissent l'énergie cinétique du véhicule en énergie thermique dans les freins, les pneus et la chaussée. Suivre ces conversions et ces transferts, c'est établir un **bilan d'énergie**.

2. L'énergie cinétique

Énergie cinétique

Un système de masse m (en kg) animé d'une vitesse v (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) possède l'**énergie cinétique**

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{en J}).$$

Exemple. Une voiture de 1300 kg à 130 km/h ($v = 36,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) : $E_c = \frac{1}{2} \times 1300 \times 36,1^2 = 8,5 \times 10^5 \text{ J}$ — presque un mégajoule. Le carré de v pèse lourd : à 65 km/h, l'énergie est déjà divisée par **quatre**.

3. Le travail d'une force constante

Travail d'une force

Le travail $W(\vec{F})$ d'une force $\vec{F}$ est le **transfert d'énergie** entre le système acteur de la force et le système la subissant.

$W(\vec{F}) > 0$ lorsque le système subissant la force reçoit de l'énergie.

Travail d'une force constante

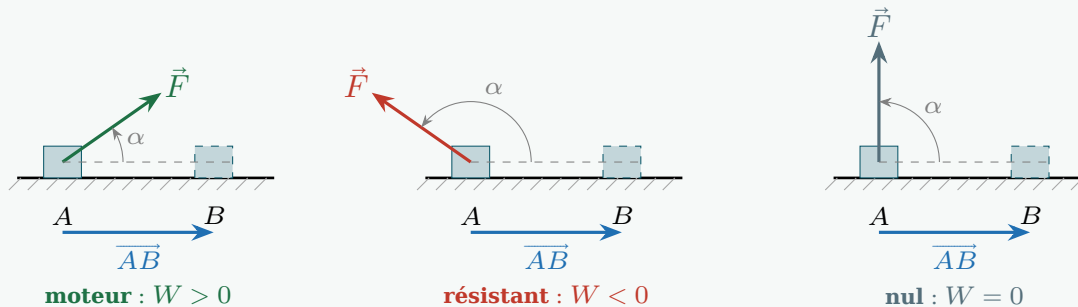
Le **travail** d'une force *constante* $\vec{F}$ sur un déplacement *rectiligne* $\overrightarrow{AB}$ s'écrit (fiche M9) :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \times AB \times \cos \alpha \quad (\text{en J}),$$

où α est l'angle entre la force et le déplacement.

Selon α , le travail est :

- **moteur** ($W > 0$: la force aide au déplacement, le système subissant la force reçoit de l'énergie);
- **résistant** ($W < 0$: la force s'oppose au déplacement, le système subissant la force perd de l'énergie);
- ou **nul** ($\alpha = 90^\circ$: la force est inutile au déplacement, le transfert d'énergie est nul).



Le **signe** de W est celui de $\cos \alpha$: la force *aide* le déplacement ($\alpha < 90^\circ$), elle y *résiste* ($\alpha > 90^\circ$), ou elle est *inutile* ($\alpha = 90^\circ$: elle ne pousse ni ne retient — c'est le cas de la réaction normale du support).

Exemple. Tirer une valise avec $F = 40$ N inclinée à 30° sur 100 m : $W = 40 \times 100 \times \cos 30^\circ = 3,5 \times 10^3$ J, moteur. La réaction normale du sol, perpendiculaire au déplacement, ne travaille **jamais** ($\cos 90^\circ = 0$).

Deux travaux importants :

- **le poids**, d'une altitude z_A à une altitude z_B : $W_{AB}(\vec{P}) = mg(z_A - z_B)$, moteur lors d'une descente. Seul le **dénivelé** compte, on va le voir;
- **les frottements** d'intensité f constante sur un trajet rectiligne de longueur L : toujours opposés au mouvement ($\alpha = 180^\circ$), $W_{AB}(\vec{f}) = -fL$ — toujours **résistant**, et il dépend de la **longueur du chemin**, non de ses extrémités.

4. Le théorème de l'énergie cinétique

Le lien entre travail et vitesse est le théorème central de la fiche. Le théorème de l'énergie cinétique est une expression de la conservation de l'énergie totale : il stipule que la variation d'énergie cinétique d'un système au cours d'un déplacement AB est égale à la somme de toutes les énergies échangées au cours du mouvement (les travaux des forces exercées).

Théorème de l'énergie cinétique (TEC)

Dans un référentiel galiléen, la variation d'énergie cinétique d'un système entre deux points A et B est égale à la **somme des travaux** de toutes les forces qui s'exercent sur lui :

$$\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = \sum W_{AB}(\vec{F}).$$

Exemple. Un chat glisse d'un balcon (point A) et tombe de $h = 7,0$ m jusqu'à toucher le sol (point B); seul travaille son poids :

$$\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = W_{AB}(\vec{P}) \iff \frac{1}{2}mv^2 - 0 = mg(h - 0)$$

d'où $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9,81 \times 7,0} = 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (42 km/h) — le résultat du chapitre 14 est retrouvé en une ligne.

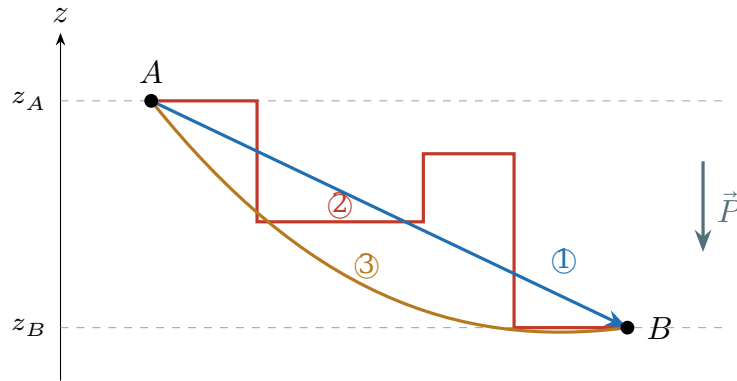
5. Forces conservatives et énergie potentielle

5.1 Forces conservatives

Force conservative

Une force est **conservative** si son travail entre A et B **ne dépend pas du chemin suivi**, mais uniquement des positions de A et de B .

Le poids est conservatif; les frottements, dont le travail croît avec la longueur du trajet, ne le sont **pas**.



Les **trois** chemins donnent le **même** travail : $W_{AB}(\vec{P}) = m g (z_A - z_B)$.

① tout droit ② en zigzag, et même en remontant ③ en cloche

Seules comptent l'**altitude de départ** et celle d'**arrivée** — pas la route suivie. **C'est la définition d'une force conservative**

Calcul sur le chemin ②

Notons $M_1, M_2, \dots, M_6$ les sommets successifs de l'escalier, de A vers B (soit $A \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow \dots \rightarrow M_6 \rightarrow B$). Le poids est constant : son travail sur un tronçon ne dépend que du **dénivelé** de ce tronçon, $W_{M_k \rightarrow M_{k+1}}(\vec{P}) = m g (z_{M_k} - z_{M_{k+1}})$. En ajoutant les tronçons bout à bout :

$$W_{AB}(\vec{P}) = m g [(z_A - z_{M_1}) + (z_{M_1} - z_{M_2}) + \dots + (z_{M_6} - z_B)] = m g (z_A - z_B).$$

Chaque altitude intermédiaire $z_{M_1}, \dots, z_{M_6}$ apparaît **deux fois, avec des signes opposés** : toutes se compensent. Il ne reste que le départ z_A et l'arrivée z_B — le zigzag, et même les remontées, ne changent rien.

5.2 Énergies potentielles

À toute force conservative on peut associer une **réserve d'énergie** qui ne dépend que de la position. En effet, le poids étant une force conservative, l'énergie perdue à la montée peut être intégralement récupérée à la descente.

Dans le théorème de l'énergie cinétique, faisons passer le travail du poids de la droite (côté transfert) à la gauche (côté stockage) :

$$\Delta E_c = W_{AB}(\vec{P}) = -m g (z_B - z_A) \implies \Delta E_c + \Delta(m g z) = 0.$$

La quantité $m g z$ se comporte comme une énergie stockée par l'altitude (plus précisément par le système {Terre + Objet} en interaction gravitationnelle) :

Énergie potentielle de pesanteur

L'**énergie potentielle de pesanteur** d'un système de masse m à l'altitude z est

$$E_{pp} = m g z \quad (\text{en J}),$$

comptée depuis une **origine des altitudes choisie librement** (sol, table...) — seules les **variations** de E_{pp} ont un sens physique.

Exemple. Monter un pack d'eau de 9,0 kg du sol à une étagère à 1,8 m : $\Delta E_{pp} = 9,0 \times 9,81 \times 1,8 = 1,6 \times 10^2 \text{ J}$ — stockés, récupérables à la descente. C'est le sens du mot *conservative* : l'énergie prêtée à la pesanteur se rend intégralement.

On associe ainsi une énergie potentielle à chaque force conservative (force électrique, force de rappel exercée par un ressort ...). Pour chaque force conservative $\vec{F}_c$, on définit la variation d'énergie potentielle :

$$\Delta E_p = -W(\vec{F}_c)$$

6. L'énergie mécanique

Énergie mécanique

L'**énergie mécanique** d'un système est la somme de son énergie cinétique et des énergies potentielles associées à des forces conservatives :

$$E_m = E_c + \sum E_p$$

Dans le cas fréquent où la seule force conservative est le poids :

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

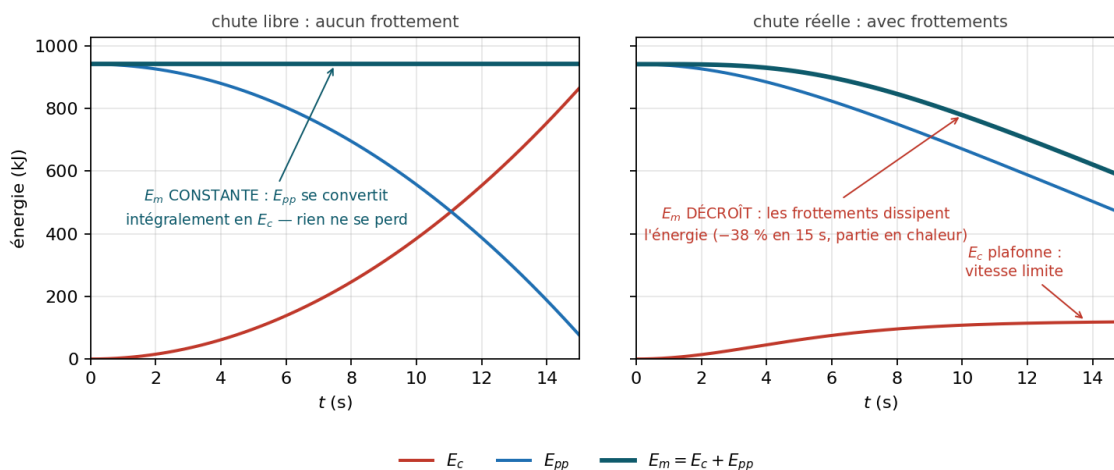
En injectant cette définition dans le théorème de l'énergie cinétique, désormais dépouillé à droite de toutes les forces conservatives, on obtient le théorème de l'énergie mécanique :

Théorème de l'énergie mécanique

La variation d'énergie mécanique d'un système entre deux points A et B est égale à la somme des travaux des forces non-conservatives $\vec{F}_{NC}$:

$$\Delta E_m = E_m(B) - E_m(A) = \sum W_{AB}(\vec{F}_{NC}).$$

Si le système n'est soumis qu'à des forces conservatives — ou si les autres forces **ne travaillent pas** —, E_m **se conserve** : E_c et E_{pp} s'échangent sans perte. Si des forces non conservatives travaillent (frottements...), l'énergie mécanique **varie**. Dans le cas des frottements, ce travail est résistant, E_m **décroît**, l'écart partant en énergie thermique.



Exemple. Un enfant de 30 kg part sans vitesse d'un toboggan de $h = 2,5$ m. Sans frottements, E_m se conserve : $v = \sqrt{2gh} = 7,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en bas. On mesure en réalité $5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: l'énergie mécanique a perdu $\Delta E_m = \frac{1}{2} \times 30 \times (5,0^2 - 7,0^2) = -3,6 \times 10^2 \text{ J}$ — le travail des frottements, devenu chaleur dans le fond du pantalon.

Pièges fréquents

- **Le signe du travail se lit sur l'angle** : $W > 0$ moteur, $W < 0$ résistant, $W = 0$ à 90° — la réaction normale d'un support ne travaille jamais.
- $W = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB}$ **exige une force constante** : pour une force qui varie le long du trajet, cette formule n'est plus valable telle quelle.
- E_{pp} **dépend de l'origine choisie** : toujours annoncer « origine des altitudes au sol » (ou ailleurs) — seules les variations comptent.
- E_m **ne se conserve pas toujours** : vérifier d'abord que les forces non conservatives ne travaillent pas ; sinon, pour des frottements, $\Delta E_m = W(\vec{f})$, négatif.
- **Le carré de v dans E_c** : doubler la vitesse quadruple l'énergie — et les distances de freinage avec.

7. Auto-test

Répondez avant de regarder les corrigés.

1. Calculer l'énergie cinétique d'un ballon de $0,62 \text{ kg}$ lancé à $7,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, puis celle d'une voiture de 1300 kg à 130 km/h .
2. Une luge est tirée sur 50 m par une corde inclinée à 20° exerçant 60 N , pendant que des frottements de 25 N s'y opposent. Calculer le travail de chaque force (corde, frottements, poids, réaction normale) sur ce trajet horizontal.
3. Par le TEC, calculer la distance de freinage d'une voiture de 1300 kg lancée à 50 km/h , si la force de freinage vaut $8,0 \times 10^3 \text{ N}$.

4. Vrai ou faux : « l'énergie potentielle de pesanteur d'un livre posé sur une table est nulle ».
5. Reprendre le toboggan du §6 : quelle fraction de l'énergie mécanique initiale est perdue en frottements ?

Corrigés

1. Ballon : $E_c = \frac{1}{2} \times 0,62 \times 7,0^2 = 15 \text{ J}$. Voiture : $v = 36,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $E_c = 8,5 \times 10^5 \text{ J}$ — cinquante mille fois plus.
2. Corde : $W = 60 \times 50 \times \cos 20^\circ = 2,8 \times 10^3 \text{ J}$ (moteur); frottements : $W = -25 \times 50 = -1,3 \times 10^3 \text{ J}$ (résistant); poids et réaction normale : perpendiculaires au déplacement horizontal, $W = 0$.
3. $0 - \frac{1}{2}mv^2 = -f d$, d'où $d = \frac{mv^2}{2f} = \frac{1300 \times 13,9^2}{2 \times 8,0 \times 10^3} = 16 \text{ m}$.
4. **Faux en général** : $E_{pp} = mgz$ dépend de l'**origine choisie**. Elle est nulle si l'on choisit l'origine des altitudes sur la table — mais pas si on la prend au sol. Seules les variations ont un sens.
5. E_m initiale : $mgh = 30 \times 9,81 \times 2,5 = 7,4 \times 10^2 \text{ J}$; perte : $3,6 \times 10^2 \text{ J}$, soit **la moitié** environ — un toboggan freine autant qu'il glisse.