

**Physique Générale C**  
Semestre d'automne (11P090)  
Notes du cours basées sur le livre  
Physique  
de Eugene Hecht, éditions De Boeck

**Chapitre 11**

Enseignante:  
Anna Sfyrla

Assistant(e)s:  
Mireille Conrad  
Tim Gazdic  
Jean-Marie Poumirol  
Rebecka Sax  
Marco Valente

**Bibliographie**

- [1] Eugene Hecht, Physique, éditions De Boeck.
- [2] Eugene Hecht, College Physics, Schaum's outlines.
- [3] Randall D. Knight, Physics for Scientists and Engineers, Pearson.
- [4] Yakov Perelman, Oh, la Physique!, Dunod.

## Table des matières

---

<b>11 L'énergie</b>	<b>1</b>
11.1 Le travail . . . . .	1
11.2 Puissance . . . . .	7
11.3 Énergie cinétique . . . . .	8
11.4 Énergie potentielle . . . . .	9
11.5 Énergie interne . . . . .	11
11.6 Conservation de l'énergie . . . . .	12
11.7 Énergie mécanique . . . . .	12

Nous étudions dans ce chapitre, l'énergie, en regardant d'abord comment elle est transférée par le *travail* et comment elle se manifeste sous deux formes fondamentale: l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. L'accent est mis sur la mécanique, mais l'énergie est omniprésente dans toutes les branches de la physique, influençant notre façon de les aborder.

L'énergie d'un système se manifeste de manières très diverses, mais toutes résultent de l'action d'une des quatre forces fondamentales. On distingue trois formes d'énergie fondamentales:

- Une énergie liée à la position relative: l'énergie potentielle;
- Une énergie liée à la vitesse relative: l'énergie cinétique;
- Une énergie liée à la configuration d'un système: l'énergie interne.

## 11.1 Le travail

**L'énergie total d'un système isolé est conservée. Elle peut être transférée par interaction d'un système à un autre, mais on ne peut ni créer de l'énergie, ni en détruire.** La force est l'agent du changement et l'énergie est une mesure du changement.

Quand deux systèmes interagissent (e.g. une balle de tennis et une raquette) il y a transfert d'énergie de l'un vers l'autre. Nous disons que le fournisseur d'énergie effectue un travail sur le bénéficiaire d'énergie.

**Le travail mesure le changement de l'énergie d'un système qui résulte de l'application d'une force qui agit sur un certain parcours.**

Au coeur du concept de travail est la notion de mouvement contre une résistance, qu'elle soit fournie par la pesanteur, un frottement, une force électrique ou n'importe quelle autre force.

Commençons par le cas le plus simple d'une masse ponctuelle (équivalent à un corps parfaitement rigide dont tous les composants se déplacent à l'unisson). Soit une force constante externe  $\vec{F}$  exercée sur cette masse qui la déplace sur une distance rectiligne  $l$ . Par définition, le travail  $W$  effectué par une force est:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{l} \tag{11.1}$$

Autrement dit, le travail d'une force constante, appliquée à un corps, est le produit de la composante de la force dans la direction du mouvement par la distance sur la quelle la force agit:

$$W = F l \cos \theta$$

L'unité de travail est le *newton-mètre*. Pour simplifier et en honneur à J.P. Joule, le travail effectué par une force de 1 newton en déplaçant un corps de 1 mètre est appelé 1 joule (J), ou

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Pour une force parallèle à la trajectoire rectiligne du mouvement, le travail  $W$  devient:

$$W = \pm F l$$

Un travail positif est effectué sur un objet quand le point d'application de la force se déplace dans le sens de la force. Un travail négatif est effectué quand le point d'application de la force se déplace dans la direction opposée à la force. Le travail est nul quand il n'y a pas de déplacement.

### Exemple 11.1.1.

1. En démarrant, une locomotive exerce une force de traction constante de 400 kN sur une distance de 0.5 km sur le train qu'elle tire. Quel est le travail effectué,  $W_d$ ?
2. En arrivant dans une gare, la locomotive exerce une force de freinage de 100 kN dans la direction opposée au mouvement pour arrêter le train sur une distance de 1 km. Quel est le travail effectué,  $W_f$ ?

### Solution

1. Dans le cas du démarrage, la direction de la force est dans le sens du mouvement, alors  $F > 0$  et  $W > 0$ :

$$W_D = +F l = +(400 \text{ kN})(500 \text{ m}) = 100 \times 10^6 \text{ J} = 200 \text{ MJ}$$

2. Dans le cas du freinage, la force est opposée à la direction du mouvement et  $W < 0$ :

$$W_D = +F l = -(100 \text{ kN})(1000 \text{ m}) = -100 \times 10^6 \text{ J} = -100 \text{ MJ}$$

NB : exprimez la distance en mètres, car les unités du travail sont en  $[\text{J}] = [\text{N}][\text{m}]$ .

**Exemple 11.1.2.** Une dépanneuse remorque une voiture sur une côte à  $20^\circ$ . La tension dans le câble est constante et la vitesse des deux véhicules est constante. Quel est le travail effectué par la dépanneuse quand elle remorque la voiture sur une distance de 0.50km sur cette pente constante en supposant que le câble fasse un angle de  $30^\circ$  avec le plan de la route et que la tension soit de 1600 N?

**Solution** Données:  $F_T = 1600 \text{ N}$ ,  $\theta = 30^\circ$  et  $l = 500 \text{ m}$ . L'angle de la route n'est pas importante ici. À trouver:  $W_{dv}$ .

Le mouvement est dans la direction de la route en pente. La composante de la force agissant dans la direction du déplacement est  $F_T \cos 30^\circ$ , indépendant de la pente de la route. Le travail est donné par:

$$W = F_T \cos 30^\circ l = \dots = 6.9 \times 10^5 \text{ J}$$

**Travail contre la pesanteur** Élever une masse  $m$  contre la gravité requiert un travail. Si on soulève  $m$  à vitesse constante, son accélération est nulle,  $\vec{a} = 0$ , c'est à dire que  $\sum \vec{F} = m\vec{a} = 0$ . Par conséquent, la force appliquée  $\vec{F}$  doit compenser exactement le poids de l'objet  $\vec{F}_W$ , sauf pendant le démarrage du mouvement où elle doit être plus grande. Force et mouvement sont verticaux et dirigés vers le haut:

$$\theta = 0 \text{ et } W = Fl \cos \theta = Fl$$

Soit  $h$  la hauteur de laquelle la charge est soulevée. Le travail effectué contre la gravité est alors:

$$W = F_W h = mgh$$

On dit couramment que ce travail est fourni à l'objet pour le soulever. Il est plus précis de dire que ce travail est fourni au système objet-Terre: on fournit un travail pour augmenter la distance entre les deux objets.

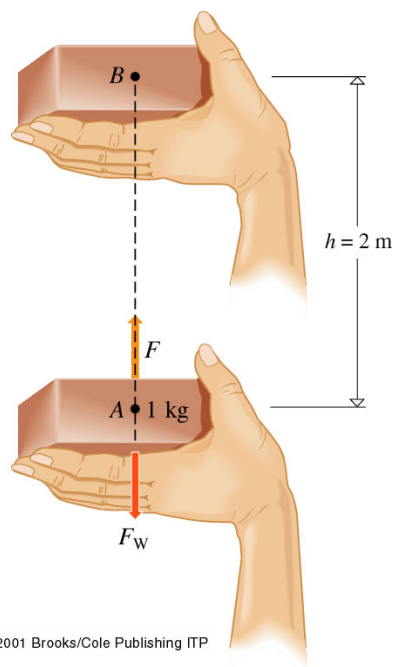
**Exemple 11.1.3.** Déterminez le travail fourni pour soulever une brique de 1 kg à vitesse très faible et constante d'une hauteur  $h = 2.0$  m. On néglige la petite force additionnelle pour déclencher le mouvement; on suppose  $g$  constant.

**Solution** Pour soulever le bloc à vitesse constante,  $a = 0$ , la somme de toutes les forces doit être nulle,  $F = ma = 0$ . Ainsi, la force appliquée,  $\vec{F}$ , doit être égale et opposée au poids du bloc,  $\vec{F}_W$ ;  $\vec{F}$  est verticale et dirigée vers le haut:

$$W = Fl \cos \theta = F_W h = mgh = \dots = 20 \text{ J}$$

Cette équation décrit le travail fait par la main contre la gravité. On peut également calculer le travail effectué par la force gravitationnelle elle-même. Sa direction est opposée au mouvement,  $\theta = 180^\circ$ , et ce travail est négatif  $W_{F_W} = -W = -20 \text{ J}$ .

Figure 11.1: La main soulève lentement le bloc en exerçant une force ascendante  $F$  légèrement plus grande que le poids  $F_W$  du bloc. Un travail est effectué pour surmonter la pesanteur, c'est à dire déplacer le bloc en s'opposant à l'interaction gravitationnelle Terre-bloc.



© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP

**Force conservative: la pesanteur** Considérons un mouvement général dans un champ gravitationnel homogène. Il n'y a pas de frottements. Imaginez qu'une charge doit être transportée sur une colline. Une petite étape de ce parcours déplace la charge de  $\Delta x$  horizontalement et la soulève d'une hauteur  $\Delta y$ . Seul le mouvement  $\Delta y$  implique un travail,  $\Delta W = mg\Delta y$ . Le mouvement horizontal n'implique aucun travail. Le travail total dépend donc seulement du déplacement vertical; il est indépendant du mouvement horizontal.

En général, en déplaçant  $m$  de  $A$  à  $B$  dans un champ gravitationnel homogène, le travail est indépendant du parcours. Seule importe la différence de hauteur entre  $A$  et  $B$ .

Une **implication importante** est que le travail est nul si on déplace une masse ponctuelle sur un parcours fermé. Les forces avec cette propriété sont appelées *forces conservatives*.

**Force non conservative: le frottement** Considérez un bloc traîné sur un plancher à une vitesse constante. La force  $F$  doit être égale et opposée à la force de frottement cinétique  $F_f$ . Cette dernière est la moyenne macroscopique d'infinies interactions microscopiques entre les atomes du bloc et du plancher.

Les régions de contact s'usent l'une sur l'autre, des soudures microscopiques sont continuellement faites et défaites. Les atomes se bousculent et de l'énergie est transférée au bloc et au plancher. Il est impossible de calculer le travail effectué sur le bloc seul. Par contre, le travail net sur l'ensemble du système bloc-plancher est bien  $F_f l$ ; le travail contre le frottement cinétique est:

$$W_f = F_f l = \mu_c F_N l$$

La force de frottement n'est pas conservative. Le travail réapparaît surtout sous forme thermique, qui chauffe à la fois le bloc et le plancher.

**Exemple 11.1.4.** Un enfant de 25 kg assis sur le gazon retient son grand chien par une laisse tendue horizontalement. Le chien tire sur la laisse avec une force de 100 N et traîne l'enfant à vitesse constante. Quel est le travail effectué par le chien sur une distance de 20 m, pour vaincre le frottement cinétique?

**Solution** Données:  $F = F_f = 100$  N et  $l = 20$  m. À trouver:  $W_f$ .

La force exercée par le chien s'oppose au frottement. Elle est constante et pointe dans la direction du déplacement. Le travail correspondant est:

$$W_f = F_f l = \dots = 2 \text{ kJ}$$

Quand un travail positif est effectué d'un système sur un autre, il y a transfert d'énergie  $W$  du premier vers le second. Dans cet exemple, le chien est la source de 2 kJ d'énergie qui finit par réchauffer l'enfant, le sol et le chien lui-même. La force de frottement s'oppose au mouvement. Elle change de direction avec les changements de direction du mouvement. Ainsi, même si l'enfant et le chien retournent au point de départ, le travail effectué contre le frottement n'est pas zéro:  $W_f$  est toujours positif.

La force de frottement n'est pas conservative.

**Travail d'une force variable** La définition du travail  $W = Fl \cos \theta$  implique que la force  $F$  est constante le long du trajet. Mais en général, la force peut varier le long du chemin (e.g. la force gravitationnelle varie comme  $1/r^2$ ) et il faut écrire explicitement  $\vec{F}(x, y, z)$  ou  $\vec{F}(r)$ .

Considérons un chemin de  $P_i$  à  $P_f$  dans un champ de force variable. On peut le décomposer en une succession de  $n$  petits segments rectilignes de longueur  $\Delta l_j$  sur lesquels la force peut être considérée constante ( $\vec{F}_j$ ).

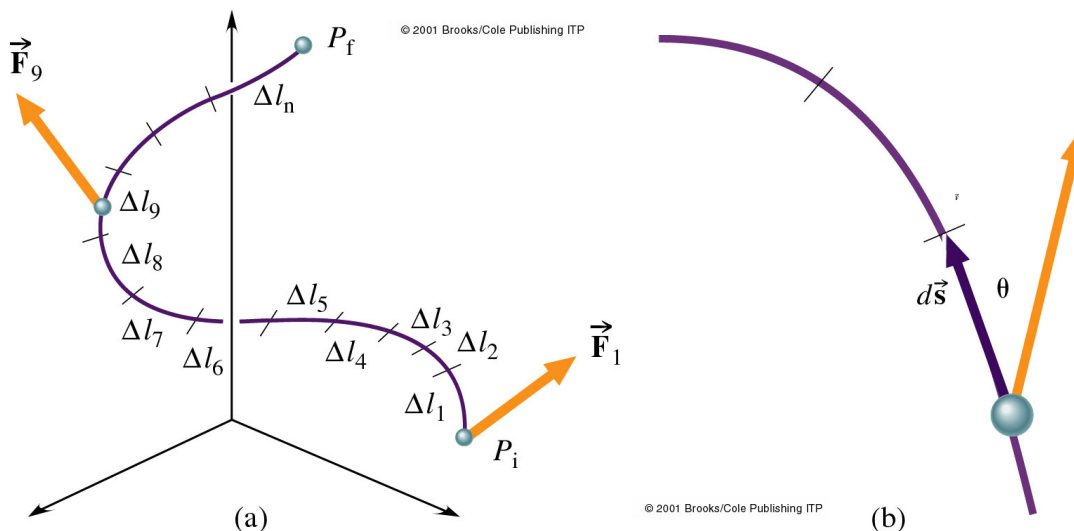


Figure 11.2: (a) Un objet se déplace dans l'espace de  $P_i$  à  $P_f$  dans un champ de force. En chaque point de l'espace, donc en chaque point de la trajectoire, une force s'exerce. (b) Un gros plan de cette géométrie.

Le travail total de  $\vec{F}(\vec{r})$  sur le chemin  $P_i$  à  $P_f$  est alors approximativement:

$$W = \sum_{j=1}^n \Delta W_j = \sum_{j=1}^n \vec{F}_j \cdot \Delta \vec{l}_j = \sum_{j=1}^n F_j \cos \theta_j \Delta l_j$$

Cette approximation devient exact dans la limite où  $n \rightarrow \infty$ , tel que  $\Delta l_j \rightarrow 0$ . La somme se transforme alors en intégrale:

$$W = \int_{P_i}^{P_f} F(\vec{r}) \cos \theta dl = \int_{P_i}^{P_f} \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{l} \quad (11.2)$$

Cette intégrale est la définition la plus générale du travail effectué par une force le long d'un chemin.

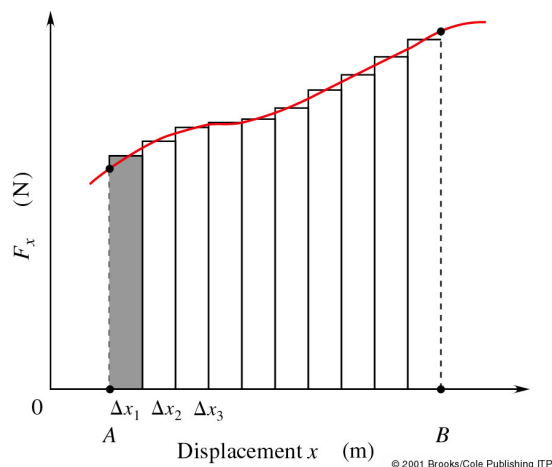
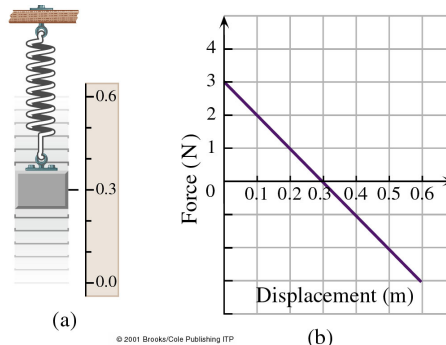


Figure 11.3: En une dimension, nous pouvons représenter graphiquement  $F_x(x)$  en fonction de  $x$  dans un diagramme appelé diagramme du travail. L'aire sous la courbe entre les deux points  $P_i$  et  $P_f$  est le travail total de la force variable quand on déplace un corps de  $P_i$  à  $P_f$ :  $A = \int_{P_i}^{P_f} F_x dx$ .

### Exemple 11.1.5.

Une masse attachée à un ressort en apesanteur est au repos à la cote 0.3 m. On écarte la masse de 30 cm de la position de repos (jusqu'à la cote 0.0 m) puis on la lâche. Le graphique montre la force en fonction du déplacement.

1. Décrivez la force variable.
2. Quel est le travail du ressort lorsque la masse se déplace de 0.0 m à 0.3 m?
3. Quel est le travail du ressort lorsque la masse se déplace de 0.3 m à 0.6 m?



### Solution

1. La force d'un ressort agit parallèlement au déplacement,  $\theta = 0$ , et varie linéairement avec le déplacement:  $F = k\Delta x$ . En  $\Delta x = 0$  la force totale est dirigée vers le haut et vaut  $F = 3.0$  N, en  $\Delta x = 0.3$  m le système est à l'équilibre et la force totale vaut 0. Enfin, à  $\Delta x = 0.6$  m la force est dirigée vers le bas et vaut  $F = -3.0$  N.

2. De  $\Delta x = 0.0$  m à  $\Delta x = 0.3$  m, la force du ressort est la cause du mouvement, au-delà elle s'oppose au mouvement. Le travail fourni par le ressort correspond à l'aire sous la courbe entre  $\Delta x = 0.0$  m et  $\Delta x = 0.3$  m:

$$W = \frac{1}{2}(\text{base})(\text{hauteur}) = 0.45 \text{ Nm} = 0.45 \text{ J}$$

3. Quand la masse dépasse la position d'équilibre en  $\Delta x = 0.3$  m, la force change de direction et pointe vers le bas,  $\theta = 180^\circ$ . C'est la masse qui travaille sur le ressort et le travail du ressort devient négatif. L'aire entre 0.3 m et 0.6 m est négative et  $W = -0.45$  J. Le travail total du ressort est nul.



## 11.2 Puissance

Pour l'exploitation d'une source d'énergie, ce n'est pas uniquement son contenu total en énergie qui compte mais aussi le taux avec lequel elle est libérée. Ce n'est pas par hasard si la notion de puissance est devenue mesurable au début de la Révolution industrielle.

La puissance est la cadence à laquelle l'énergie est transformée d'une forme en une autre, ou transférée d'un système à un autre:

$$\text{Puissance} = \frac{\text{travail effectué}}{\text{intervalle de temps}}$$

Pour un intervalle de temps  $\Delta t$  fini, nous parlons de puissance moyenne  $P_m$ :

$$P_m = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

Pour exprimer la variation de la puissance avec le temps, on définit la puissance instantanée:

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta W}{\Delta t} \right) = \frac{dW}{dt}$$

Si l'énergie est dégagée à un taux constant, la puissance instantanée est égale à la moyenne. L'unité de puissance SI est le watt (W):

$$[\text{Puissance}] = 1W = 1J/s$$

**Exemple 11.2.1.** La vitesse moyenne de l'ascenseur express de la tour Sears à Chicago est de 548.6 m/min. Quelle est la puissance moyenne délivrée par son moteur lors de la montée d'une charge totale de  $1.0 \times 10^3$  kg au 103<sup>e</sup> étage à 408.4 m au-dessus du sol?

**Solution** Données:  $v_m = 9.144$  m/s,  $\Delta l = 408.4$  m et  $m = 1.0 \times 10^3$  kg. À trouver:  $P_m$ . Nous calculons d'abord l'énergie requise pour monter la charge (d'après l'eq. 11.2)

$$\Delta W = Fh = mgh = \dots = 4.0 \times 10^6 \text{ J}$$

Le temps de montée peut être calculé à partir de la vitesse moyenne:

$$v_m = \frac{\Delta l}{\Delta t} \rightarrow \Delta t = \frac{h}{v_m} = 44.6 \text{ m}$$

La puissance moyenne est:

$$P_m = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \dots = 90 \text{ kW}$$

### Puissance et mouvement

Si une force  $F$  agit sur un corps qui se déplace d'une certaine distance  $\Delta l$ , l'eq. 11.2 implique qu'un travail  $\Delta W = (F \cos \theta) \Delta l$  est fait. Si ce processus dure un temps  $\Delta t$ , la puissance moyenne est:

$$P_m = \frac{\Delta W}{\Delta t} = F \cos \theta v_m$$

et à la limite lorsque  $\Delta t \rightarrow 0$ :

$$P = Fv \cos \theta \Rightarrow P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

La puissance est égale au produit de la composante de la force dans la direction du mouvement avec la vitesse.

### 11.3 Énergie cinétique

Pour comprendre le concept d'énergie cinétique, considérons un corps de masse  $m$  sous l'influence d'une force constante  $F$ . Le travail effectué par cette force sur une distance  $l$  est:

$$W = F l = m a l$$

L'accélération  $a$  est constante car la force est constante. La vitesse change de  $v_i$  à  $v_f$  (équation 2.8):

$$v_f^2 - v_i^2 = 2a l \Rightarrow a l = \frac{1}{2}(v_f^2 - v_i^2)$$

En multipliant les deux membres par  $m$ , nous obtenons le travail  $W$  en fonction des vitesses finale et initiale:

$$W = m a l = \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2)$$

Ainsi le travail modifie la quantité  $\frac{1}{2}mv^2$ , qui par définition est l'énergie cinétique  $E_C$ :

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow W = E_{Cf} - E_{Ci} = \Delta E_C$$

L'unité SI de l'énergie cinétique, comme de toute forme d'énergie, est le Joule [J]:

$$[\text{Energie}] = [m] \cdot [v^2] = \text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \equiv \text{J (Joule)}$$

**Exemple 11.3.1.** Calculez l'énergie cinétique d'un avion au décollage. L'avion pèse  $2.2 \times 10^6$  N et décolle à 268 m/s.

**Solution** Pour calculer l'énergie cinétique il faut connaître la masse de l'avion:

$$F_W = mg \rightarrow m = \dots = 2.24 \times 10^5 \text{ kg}$$

La vitesse de l'avion permet de calculer son énergie cinétique:

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 = \dots = 8.0 \times 10^9 \text{ J}$$

L'énergie cinétique est une quantité relative; nous choisissons effectivement le zéro de l'énergie cinétique, en choisissant le système de coordonnées par rapport auquel la vitesse est mesurée.

La Terre est prise comme référence "immobile" dans l'exemple précédent et on calcule la vitesse par rapport au sol. Si vous étiez dans l'avion, "au repos" à côté de votre valise de 20 kg, votre valise n'a aucune énergie cinétique par rapport à vous; l'avion n'en a pas non plus. Mais un observateur au sol vous voit passer à 268 m/s: pour lui, votre valise a une énergie cinétique de  $7.2 \times 10^5$  J.

Ce qui compte en matière d'énergie liée au mouvement, ce n'est pas l'énergie absolue du système, mais **l'énergie qui lui est transférée ou retirée**<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Il faudra la relativité pour introduire un invariant d'énergie, l'énergie dans le centre de masse  $E = m c^2$ .

**Théorème de l'énergie cinétique**

**Le travail total effectué pour accélérer un objet rigide est égal à la variation de son énergie cinétique**, une conclusion connue sous le nom de **théorème de l'énergie cinétique**.

Il est important de noter que ce théorème n'est valable que pour les corps rigides indéformables (e.g. particule ponctuelle). Il ne s'applique pas, même approximativement, aux corps déformables (ressort, élastique, liquide etc...): une bonne partie du travail peut disparaître dans la déformation de l'objet et ne causer aucun effet cinématique (ce travail affecte par contre l'énergie interne).

**Exemple 11.3.2.** Un homme de 70 kg peut courir à une vitesse maximum d'environ 10 m/s. Calculer son  $E_C$  maximum.

**Solution** Données:  $m = 70$  kg et  $v_{max} = 10$  m/s. À trouver:  $E_C$  max. Son  $E_C$  maximum est:

$$E_C \text{ max} = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = \dots = 2.5 \times 10^3 \text{ J}$$

**Énergie cinétique de rotation**

Considérons un corps rigide tournant autour d'un axe fixe. À tout instant, chaque particule du corps a une  $E_C$  individuelle. Le corps tournant a donc une  $E_C$  de rotation. En général, un système en rotation possède une énergie cinétique de rotation.

Pour chaque masse ponctuelle  $m_{\bullet j}$ , l'énergie cinétique sera  $E_{Cj} = \frac{1}{2}m_{\bullet j}v_j^2$ . Mais  $v_j = r_j\omega$  car chaque particule a la même vitesse angulaire  $\omega$  que le corps. Donc:

$$E_{Cj} = \frac{1}{2}m_{\bullet j}v_j^2 = \frac{1}{2}m_{\bullet j}r_j^2\omega^2 \Rightarrow$$

$$E_C = \frac{1}{2}\left(\sum_{j=1}^n m_{\bullet j}r_j^2\right) \omega^2 \Rightarrow E_C = \frac{1}{2}I\omega^2$$

Si un corps rigide est en mouvement de translation sans rotation, son énergie cinétique est  $E_C = \frac{1}{2}mv_{cm}^2$ . Si le corps rigide est en mouvement de rotation sans translation, son énergie cinétique est  $E_C = \frac{1}{2}I\omega^2$ . En général si le corps est à la fois en mouvements de translation et de rotation, son énergie cinétique est  $E_C = \frac{1}{2}mv_{cm}^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$ . Fondamentalement il n'y a rien de nouveau dans l'énergie cinétique de rotation; elle est simplement l'énergie cinétique de translation des particules constituantes due à la rotation du corps rigide.

**11.4 Énergie potentielle**

Considérons une force qui agit continuellement (e.g. la force gravitationnelle, la force d'un ressort). Pour déplacer un objet contre cette force, il faut fournir un travail. Si l'objet est lâché, il se met en mouvement sous l'effet de la force et récupère de l'énergie cinétique.

Que devient le travail pendant que l'objet est maintenu immobile? L'énergie est emmagasinée dans le système (Terre-objet, Ressort-objet), prête à être libérée. Cette énergie liée à la position d'un objet dans un champ de force, ou à la position relative de corps qui exercent une force l'un sur l'autre, est appelée **énergie potentielle**,  $E_P$ .

L'énergie potentielle fait partie de la grande chaîne de toutes les formes d'énergie. Le travail peut être stocké sous forme d'énergie potentielle avant d'être transformé en énergie cinétique, ou vice versa. L'énergie potentielle existe seulement dans le cas d'objets en interaction.

### Énergie potentielle gravitationnelle sur Terre

Quand un peintre gravit un mât, il effectue un travail contre la gravitation. Il est toujours pratiquement immobile, et la force qu'il doit exercer correspond exactement à celle qui agit sur lui. Le travail vaut:

$$F = F_W = mg \Rightarrow W = Fl = mg\Delta h$$

où  $\Delta h = h_f - h_i$  est la différence de hauteur.

Pour des déplacements proches de la Terre,  $g$  est constant. Si le peintre est immobile au début comme à la fin du déplacement, le changement de son énergie potentielle est:

$$\Delta E_P = W = mg\Delta h$$

Comme toute énergie est relative, seule la hauteur relative entre en considération: le niveau de référence, c'est-à-dire le point zéro de  $h$  et de  $E_P$  est totalement arbitraire. La seule énergie mesurable en absolu est la variation de l'énergie potentielle.

Définissons par exemple la surface de la Terre comme niveau de référence. La différence entre l'énergie potentielle à ce niveau  $h_0$  et une hauteur  $h$  plus élevée est:

$$\Delta E_P = E_{Pf} - E_{P0} = mg(h - h_0)$$

Dire que  $h_0$  est le niveau référence signifie qu'on compte la hauteur à partir de ce point. Alors:

$$h_0 = 0 \Rightarrow E_{P0} = mgh_0 = 0$$

$$W = \Delta E_P = E_{Pf} = mgh$$

Le travail effectué pour soulever une masse est égal à l'accroissement de son énergie potentielle dans le champ gravitationnel.

**Exemple 11.4.1.** Un peintre porte un pot de peinture de 2 kg. Il grimpe 10 m le long du mât au dessus du toit d'une tour de 30 m. (a) De combien augmente l'énergie potentielle du pot lors de cette ascension? (b) Quelle énergie potentielle a gagné le pot depuis qu'il a quitté le sol?

**Solution** Données: les hauteurs de 30 m et 10 m, masse  $m=2$  kg.

(a) Lors de l'ascension sur le mât:

$$\Delta E_P = mg\Delta h = (2 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)(10 \text{ m}) = 196 \text{ J}$$

(b) Quand on hisse le pot depuis le sol, il est soulevé de 40 mètres, et:

$$\Delta E_P = mg\Delta h = (2 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)(40 \text{ m}) = 4 \times 196 \text{ J} = 784 \text{ J}$$

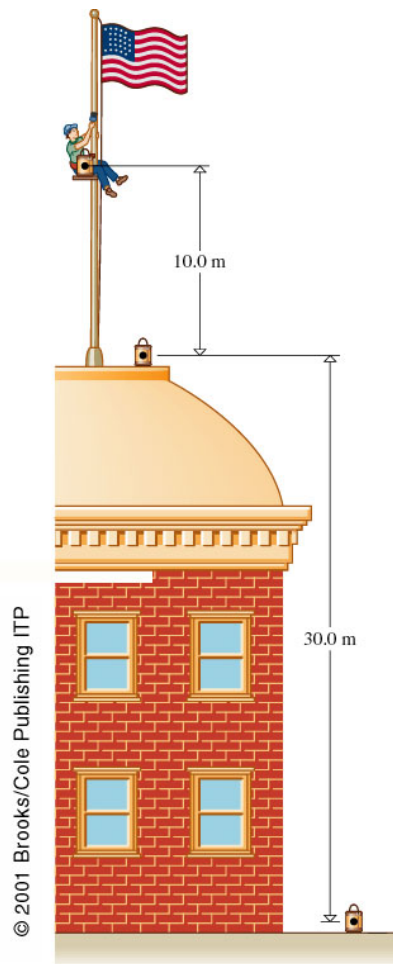


Figure 11.4: Le peintre de la hampe du drapeau a une énergie potentielle gravitationnelle donnée par  $E_P = mgh$ , où  $h$  est mesurée à partir d'un niveau quelconque pris comme origine ( $h=0$ ). Seule la variation de  $E_P$  est mesurable, donc la position du niveau  $h = 0$  n'a aucune importance.

Selon le choix du niveau de référence,  $E_P$  peut être positive ou négative. Considérons un train de montagnes russes. Il part du sommet (hauteur  $h_i$ ) et descend jusqu'au premier minimum (hauteur  $h_f < h_i$ ). L'énergie potentielle change de  $\Delta E_P = E_{Pf} - E_{Pi} = mg(h_f - h_i) < 0$ , ce qui montre que l'énergie potentielle diminue.

## 11.5 Énergie interne

Les deux formes d'énergies introduites plus haut (potentielle et cinétique) se distinguent en deux autres: l'énergie interne et l'énergie externe. Quelques exemples sont donnés en bas:

- Énergie cinétique interne: Dans une boule au repos, tous les atomes vibrent au voisinage de leur position d'équilibre avec de grandes vitesses de l'ordre de 400 m/s. Nous appelons cette énergie cinétique interne et désordonnée, énergie thermique.
- Énergie cinétique externe: Une boule lancée en l'air a un mouvement global qui se superpose à celui de chaque atome, qui correspond à une énergie cinétique externe.
- Énergie potentielle interne: Si la boule est déformée, par une collision par exemple, elle emmagasine de l'énergie élastique, une des formes de l'énergie potentielle interne.

- Énergie potentielle externe: Si la distance Terre-boule change, la boule gagne ou perd de l'énergie potentielle externe.

En progressant dans notre étude de la physique, nous rencontrerons plusieurs types d'actions des quatre forces fondamentales qui permettent d'emmagasiner de l'énergie potentielle interne et externe. Exemples: énergie chimique, électrique, magnétique ou nucléaire.

## 11.6 Conservation de l'énergie

L'un des énoncés les plus fondamentaux de toute la physique est la loi de conservation de l'énergie: **L'énergie totale de tout système isolé du reste de l'Univers reste constante, mais l'énergie peut être transformé d'une forme à l'autre à l'intérieur du système.**

Dans l'hypothèse où l'énergie de l'Univers est constante sur toute sa durée de vie, l'énergie de toute portion de cet Univers isolée du reste doit aussi être constante. S'il n'y a aucun transfert d'énergie de l'extérieur vers ce système ou de ce système vers l'extérieur (c'est ce que signifie ici le mot isolé), et si l'énergie interne ne peut être créée sans en consommer autant, ni l'énergie du système, ni celle du reste de l'Univers ne peuvent varier.

Nous appliquons ce principe tout à fait général aux formes d'énergie que nous connaissons déjà, l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. Mais il ne faut pas oublier que cette loi s'applique à la somme de toutes les formes d'énergie.

## 11.7 Énergie mécanique

L'énergie mécanique  $E$  d'un système est la somme de l'énergie cinétique  $E_C$  et de l'énergie potentielle gravitationnelle  $E_P$ :  $E = E_C + E_P$ . Cette définition néglige toute énergie interne et toute énergie externe sauf celle causée par la gravité.

Supposons que le système fournit un travail  $W_{ext}$  contre une force externe appliquée autre que la gravité. Son énergie mécanique est alors diminuée par une portion  $W$ , et passe de  $E_i$  à  $E_f < E_i$ , impliquant une variation de l'énergie gravitationnelle et/ou de l'énergie cinétique:

$$W_{ext} = \Delta E = E_f - E_i = \Delta E_C + \Delta E_P$$

S'il n'y a aucune force extérieure autre que la gravité, le système n'effectue pas et ne reçoit pas de travail,  $E_i = E_f$  et **l'énergie mécanique est conservée**. Ceci est une forme restreinte de la loi de conservation de l'énergie, ne tenant compte que de l'énergie mécanique.

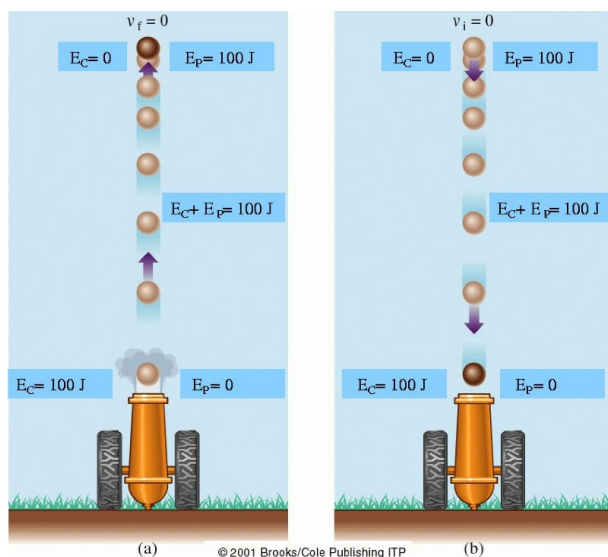


Figure 11.5: (a) En montant, un boulet de canon tiré vers le haut perd de l'énergie potentielle gravitationnelle. Tiré avec  $E_{C_i} = 100$  J, il aura toujours une énergie totale de 100 J. En réalité une partie de l'énergie sera perdue à cause de la résistance de l'air. (b) Quand le boulet descend après s'être immobilisé au faite de sa trajectoire, il perd de l'énergie potentielle et gagne de l'énergie cinétique.

Considérons la situation démontré à la figure 11.5 et supposons que  $g$  soit constant. La loi de conservation se traduit par:

$$W_{ext} = \Delta E = \Delta E_C + \Delta E_P \Rightarrow$$

$$W_{ext} = \left(\frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2\right) + (mgh_f - mgh_i)$$

Si aucune force autre que la gravitation agit sur le système,  $W_{ext} = 0$  et la loi de conservation s'écrit:

$$\frac{1}{2}mv_f^2 + mgh_f = \frac{1}{2}mv_i^2 + mgh_i$$

À chaque instant du mouvement, l'énergie mécanique totale est constante; si l'énergie cinétique du corps augmente, son énergie potentielle diminue, et vice versa.

Le pendule est un autre exemple de la conservation de l'énergie mécanique. Au début du trajet, nous élevons la masse à une hauteur  $h$  au-dessus de la position d'équilibre. Nous augmentons ainsi son énergie potentielle de  $mgh$ . En lâchant la masse, elle est accélérée jusqu'à une énergie cinétique équivalente, qu'elle atteint au point d'équilibre, convertissant toute l'énergie potentielle accumulée. En continuant, la gravitation ralentit le mouvement, jusqu'à ce que toute l'énergie soit reconvertie en énergie potentielle. A ce point la masse est de nouveau au repos pour un petit instant.

On peut aussi analyser ce pendule du point de vue de la force de pesanteur: Sur la première moitié de la trajectoire, la force de pesanteur fourni un travail au pendule équivalent à  $W = F d = mg d = mgh$ . Ce travail est entièrement convertit en énergie cinétique du pendule  $W = mgh = E_C = \frac{1}{2}mv^2$ . Sur la seconde moitié de la trajectoire, le pendule travaille contre la force de pesanteur et son énergie cinétique est reconvertie en énergie potentielle.

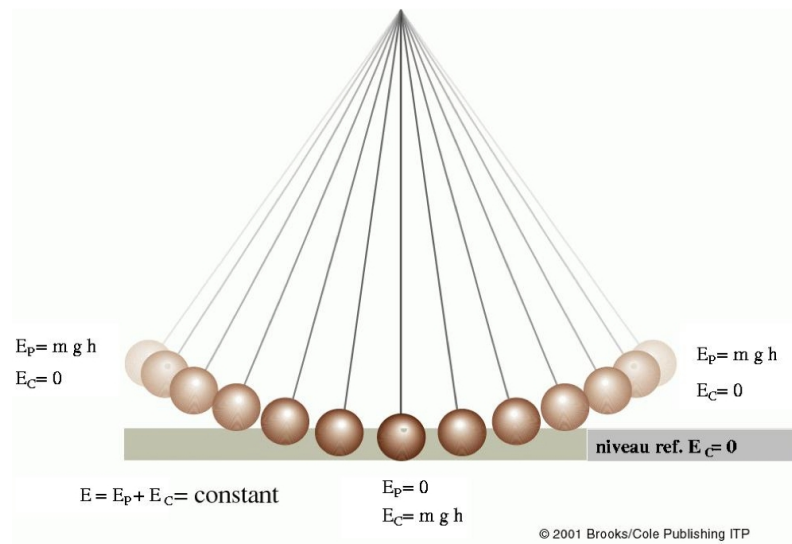
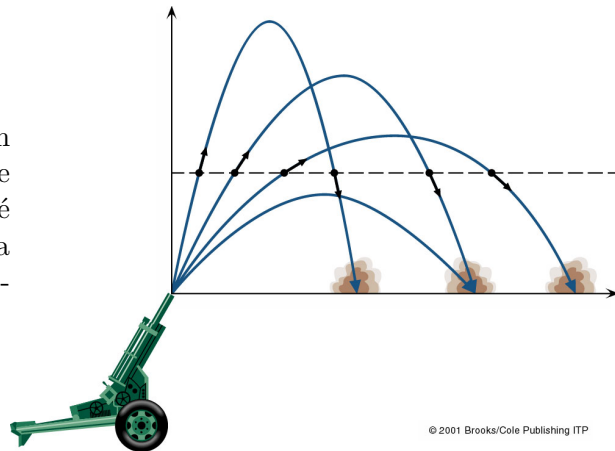


Figure 11.6: Le transfert d'énergie d'une forme à une autre au cours de l'oscillation d'un pendule.

### Question pour réfléchir.

Imaginons des boulets de canon identiques, tirés avec la même vitesse en module, comme indiqué sur le dessin ci-contre. Quelle sera la relation entre leurs vitesses, en module, à la même hauteur  $h$ ?



**Exemple 11.7.1.** Pourquoi une planète accélère-t-elle sur son orbite en s'approchant du Soleil?

**Solution** Nous avons déjà répondu à cette question sur la base des lois de Newton. Nous disposons maintenant d'une seconde méthode basée sur la conservation d'énergie mécanique:  $E_C + E_P = \text{constante}$ . Quand la planète s'approche du Soleil, elle perd de l'énergie potentielle. Comme l'énergie totale doit être constante, l'énergie cinétique augmente. La vitesse de la planète augmente. Au périhélie, la planète a un minimum d'énergie potentielle et un maximum d'énergie cinétique: sa vitesse est donc maximale. A l'aphélie, l'énergie potentielle est maximale: l'énergie cinétique et la vitesse sont donc minimales.



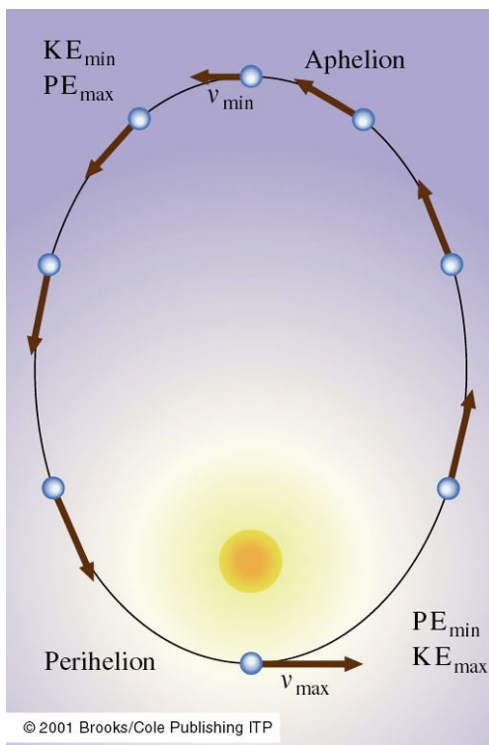


Figure 11.7: Une planète en orbite elliptique autour du Soleil. En s'approchant du Soleil, elle accélère. La vitesse de la planète est la même lorsqu'elle est à égales distances du Soleil, en s'approchant ou en s'éloignant du Soleil car alors l'énergie potentielle est la même, donc l'énergie cinétique doit aussi être la même.

## Exercices

**Exercice 11.1.** (a) Trouver l'énergie potentielle gravitationnelle d'une masse  $m$  à une distance  $r$  du centre de gravité d'un corps de masse  $M$ . Quelle est la variation de l'énergie potentielle d'une masse  $m$  entre la surface de la Terre et une altitude  $h$  comparable à son rayon. Quelle est l'énergie potentielle à une basse altitude  $h$ .

(b) La vitesse de libération  $v_{lib}$  est la vitesse minimum qui permet à un corps de masse  $m$  non propulsé de s'éloigner indéfiniment d'une planète de masse  $M$  et rayon  $R$  sans jamais y retomber. Calculer cette vitesse par rapport au centre de gravité de la planète.

**Exercice 11.2.** Quelle est la variation d'énergie potentielle d'un météorite de 100 kg, s'il tombe en chute libre de 1000 km jusqu'à la surface de la Terre: prendre la masse de la Terre  $6 \times 10^{24}$  kg et son diamètre  $1.28 \times 10^7$  m.

**Exercice 11.3.** Soit le looping dessiné ci contre.

- Quelle est l'énergie mécanique de la bille au point A?
- Quelle est l'énergie mécanique de la bille en bas du looping?
- De quelle hauteur minimale  $h$  faut-il lâcher la bille pour qu'elle passe le looping sans décoller du rail?

