

# LE TRAVAIL: UN MODE DE TRANSFERT DE L'ENERGIE

## 1. QU'EST CE QUE L'ENERGIE ?

L'énergie caractérise la capacité à fournir du travail, à donner du mouvement, à modifier la température ou à transformer la matière.

Elle est produite à partir de différentes sources que l'on trouve dans la nature: le bois, le charbon, le pétrole, le gaz, le vent ou le rayonnement solaire. Elle peut prendre différentes formes: chaleur, énergie mécanique ou énergie électrique.....

Ses formes multiples peuvent se transformer l'une en l'autre, par exemple, de chaleur en énergie mécanique, dans un moteur de voiture, ou en énergie électrique, dans une centrale électrique au charbon ou au gaz.

## 2. ENERGIE CINETIQUE.

### 2.1. ENERGIE CINETIQUE D'UN POINT MATERIEL.

On a trouvé la relation (voir Tp physique 7):

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = W(\vec{p})$$

$W(\vec{p})$  représente le travail du poids de la balle effectué au cours de la chute. Cette expression s'exprime donc en Joule, unité de travail et d'énergie.

Ainsi,  $\frac{1}{2}m \cdot v^2$  représente une énergie: c'est l'énergie acquise par la balle, due à sa vitesse. On l'appelle **énergie cinétique**.

#### Définition.

Un point matériel de masse  $m$  et de vitesse instantanée  $v$ , transporte d'un point à un autre d'un référentiel une grandeur scalaire positive appelée **énergie cinétique** qui caractérise son état de mouvement.

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} m \text{ en kg} \\ E_c \text{ en Joule} \\ v \text{ en m.s}^{-1}. \end{array}$$

#### Remarque.

On constate donc que l'énergie cinétique est doublée si la masse de l'objet est doublée, elle est quadruplée si sa vitesse est doublée.

Ainsi, un choc à 30 km.h<sup>-1</sup> n'est pas deux fois, mais quatre fois plus destructeur qu'un choc à 15 km.h<sup>-1</sup> !!!

De même, les dégâts causés par un camion sont plus importants que ceux causés par une automobile roulant à la même vitesse.

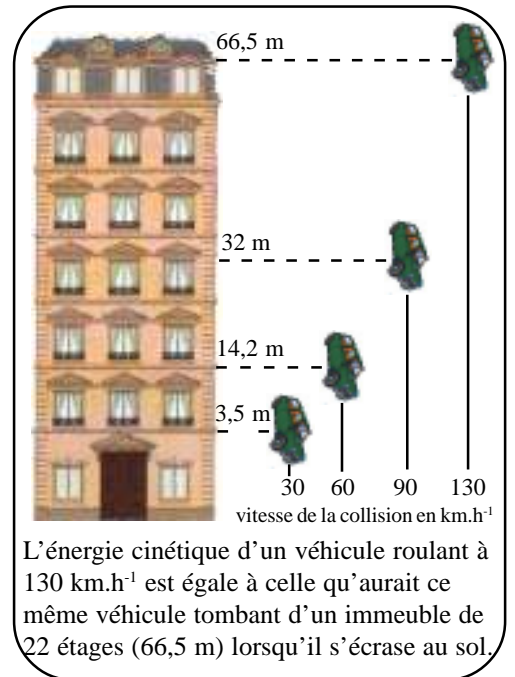
Enfin, c'est l'énorme énergie cinétique que possède le Titanic, qui le rend incontrôlable lors de la collision avec l'iceberg.

### 2.2. ENERGIE CINETIQUE D'UN SOLIDE ANIME D'UN MOUVEMENT DE TRANSLATION.

L'énergie cinétique d'un ensemble de points matériels est égale à la somme des énergies cinétiques des points matériels de l'ensemble.

Dans le cas d'un solide de masse  $M$  animé d'un mouvement de translation, tous les points du solide ont le même vecteur vitesse, celui du centre d'inertie  $\vec{v}_G$ .

On peut donc écrire l'énergie cinétique de ce solide sous la forme:  $E_c = \frac{1}{2} M v_G^2$



### 3. THEOREME DE L'ENERGIE CINETIQUE.

#### 3.1. VARIATION D'ENERGIE CINETIQUE ET TRAVAIL DES FORCES EXTERIEURES.

A partir de l'exemple du lâcher de la bille, on peut essayer de rechercher une interprétation énergétique de la relation:  $\frac{1}{2} m.v^2 = m.g.h$   
Notons A le point de départ de la bille (vitesse  $v_A = 0$ , donc  $Ec_{(A)} = 0$ ) et B le point d'arrivée (vitesse  $v_B = v$ ).

On aura alors:

$$\frac{1}{2} m.v^2 = \frac{1}{2} m.v_B^2 - \frac{1}{2} m.v_A^2 = Ec_{(B)} - Ec_{(A)}$$

représente donc la variation d'énergie cinétique de la bille entre les points A et B.

$m.g.h = W_{AB}(\vec{p})$  représente le travail du poids  $\vec{p}$  de la bille, entre A et B.

Donc:  $Ec_{(B)} - Ec_{(A)} = W_{AB}(\vec{p})$

Le travail du poids est donc égal à la variation d'énergie cinétique. Le travail apparaît donc comme un transfert d'énergie.

#### Remarque.

Le mobile étant en mouvement sans frottement,  $\vec{p}$  est la seule force extérieure qui lui soit appliquée (le travail de la réaction du support est nulle, car la réaction est perpendiculaire au mouvement). Ainsi:  $W_{AB}(\vec{p}) = W_{AB}(\vec{F}_{ext})$

Donc:  $Ec_{(B)} - Ec_{(A)} = W_{AB}(\vec{F}_{ext})$ .

#### 3.2. CAS GENERAL. ENONCE.

Le résultat précédent est général. Il est connu sous le nom de *théorème de l'énergie cinétique*.

Dans un référentiel galiléen, la variation de l'énergie cinétique d'un solide est égale à la somme des travaux de toutes les forces extérieures appliquées à ce solide:

$$\Delta Ec = Ec_{(Etat Final)} - Ec_{(Etat Initial)} = W_{AB}(\vec{F}_{ext})$$

#### 3.3. EFFET D'UN TRAVAIL MOTEUR OU RESISTANT.

Lorsque la somme des travaux  $\sum W_{AB}(\vec{F}_{ext})$  de l'ensemble des forces extérieures appliquées à un solide en translation est positive pour le déplacement de A à B, alors la différence d'énergie cinétique du solide correspondante  $Ec_{(B)} - Ec_{(A)}$  est positive. On en déduit que  $v_B^2 > v_A^2$ , soit  $v_B > v_A$ .

Inversement, lorsque la somme de ces travaux est négative, alors  $v_B < v_A$ .

#### Remarque.

1.- Connaissant la valeur du travail  $W_{AB}$  des forces agissant sur un solide en translation lors de son déplacement de A à B, et la valeur de la vitesse  $\vec{v}_A$ , il est possible de calculer la valeur de la vitesse  $\vec{v}_B$ .

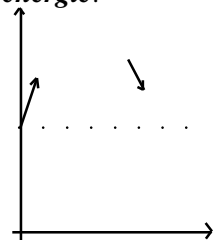
En revanche, cela n'apporte *aucune information* ni sur la *direction*, ni sur le *sens* du vecteur vitesse  $\vec{v}_B$ .

2.- C'est le travail des forces extérieures appliquées qui fait varier l'énergie cinétique du solide. Un transfert d'énergie s'effectue donc du fait du travail des forces extérieures; on dit que *le travail mécanique est un mode de transfert de l'énergie*.

#### Exemple.

Depuis la position  $x = 0$  de la boule jusqu'à une position quelconque  $z > 150$  cm (l'altitude initiale de la boule lors du lancement), le travail du poids est résistant et la vitesse  $v$  de l'objet est inférieure à sa vitesse à l'origine  $v_1$ . Par la suite, le travail du poids est moteur et  $v$  est supérieure à  $v_1$ .

On ne peut pas pour autant en déduire une information sur le sens et la direction des vecteurs vitesses.



## 4. ENERGIE POTENTIELLE GRAVITATIONNELLE.

### 4.1. NOTION D'ENERGIE POTENTIELLE GRAVITATIONNELLE.

Un rocher, lors de sa chute, peut écraser une maison. L'eau d'un barrage, lors de sa chute, actionne la turbine d'une centrale électrique. Une avalanche de neige peut provoquer de graves dégâts.

Tous ces corps ont "stocké" une énergie liée à leur altitude, appelée **énergie potentielle**, qui peut être transformée en énergie cinétique. Cette forme d'énergie est liée à l'interaction gravitationnelle qui existe entre le corps et la Terre: on l'appelle énergie potentielle gravitationnelle.

Un ressort comprimé ou un arc tendu possèdent aussi de l'énergie en "réserve", appelée énergie potentielle élastique. Ainsi, lorsque l'arc se détend, il communique

à la flèche de l'énergie cinétique.

Nous allons nous intéresser uniquement à l'énergie potentielle gravitationnelle, dans le cas particulier d'un solide placé au voisinage de la Terre (l'intensité de la pesanteur étant alors considérée comme constante). Cette énergie est alors appelée **énergie potentielle de pesanteur**.

### 4.2. EXPRESSION DE L'ENERGIE POTENTIELLE DE PESANTEUR.

#### Mise en évidence.

Nous avons établi la relation:  $E_c = E_{c(\text{Etat Final})} - E_{c(\text{Etat Initial})} = W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}})$

Prenons le cas où on saisit une valise, initialement immobile sur le plancher (A position du centre d'inertie de la valise:  $v_A = 0$  et  $z = z_A$ ), à la main, sur lequel on exerce une force  $F$  vers le haut, pour la poser sur le support à bagages se trouvant au-dessus de nous. Le centre d'inertie de la valise est ainsi amené à sa position finale (B:  $v_B = 0$  et  $z = z_B > z_A$ ).

On peut alors établir:

$$E_c = E_{c(B)} - E_{c(A)} = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = 0 = W_{AB}(\vec{F}) + W_{AB}(\vec{p})$$

Ce qui donne:  $W_{AB}(\vec{F}) = -W_{AB}(\vec{p}) = -m \cdot g \cdot (z_B - z_A) = m \cdot g \cdot z_B - m \cdot g \cdot z_A$

Le travail que l'opérateur effectue pour déplacer le solide peut s'exprimer en fonction des quantités  $mgz_B$  et  $mgz_A$  donc, de manière générale, en fonction de la quantité  $mgz$  qui représente l'**énergie potentielle de pesanteur** du solide S.

#### Définition.

L'énergie potentielle de pesanteur d'un solide dans l'environnement terrestre est liée à sa position par rapport à la Terre. Elle a pour expression:

$$E_p = m \cdot g \cdot z$$

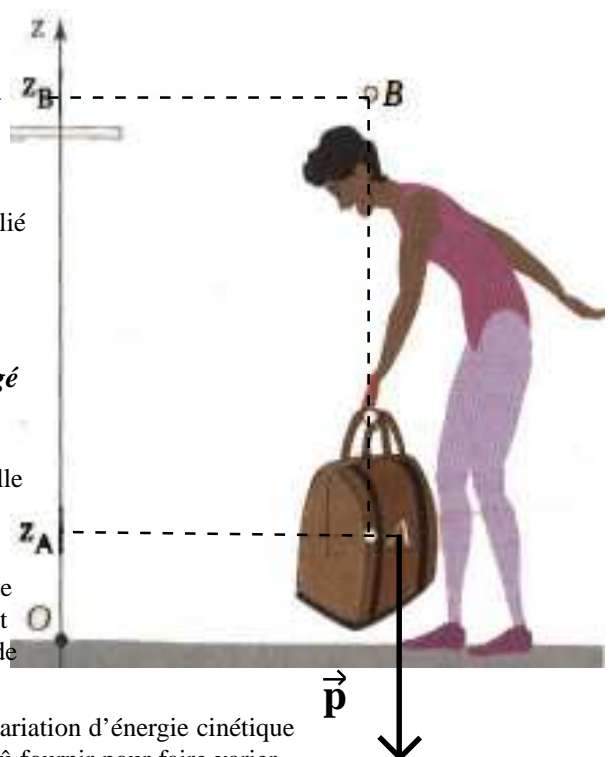
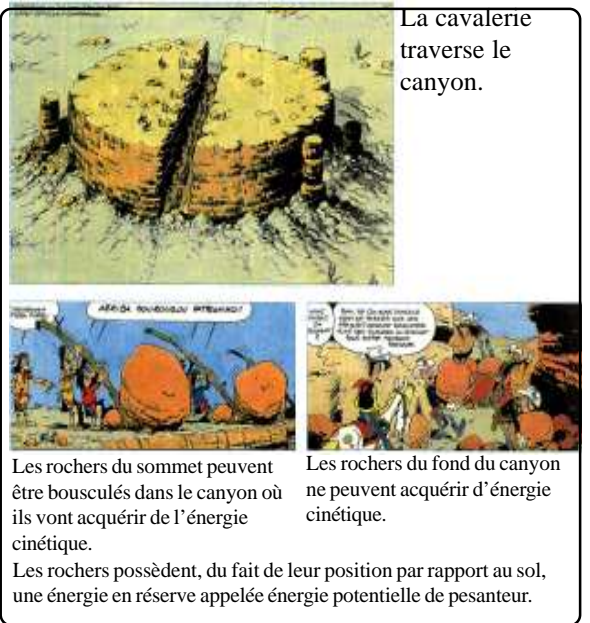
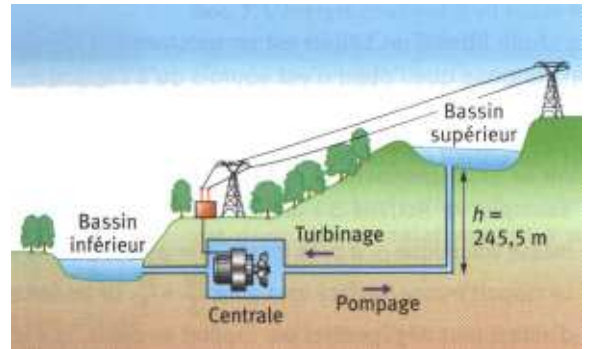
#### Remarque.

$z$  est la position du centre d'inertie du solide repérée sur un axe Oz vertical, **dirigé vers le haut**.

L'énergie potentielle de pesanteur s'évalue à partir d'un niveau de référence où elle est nulle, cette référence n'étant pas forcément le sol. Les variations d'énergie potentielle ne dépendent pas de la référence choisie.

La formule de  $E_p$  suppose que, dans le domaine où se situe le solide, l'intensité de pesanteur  $g$  reste constante. Or,  $g$  varie avec l'altitude. En pratique, la formule est applicable tant que les variations de  $g$  sont faibles, c'est-à-dire jusqu'à une altitude de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres.

On a donc établi la formule  $W_{AB}(\vec{F}) = E_{p(B)} - E_{p(A)}$ , dans le cas particulier où la variation d'énergie cinétique est nulle.  $W_{AB}(F)$  représente le travail qu'un opérateur extérieur (le voyageur) a dû fournir pour faire varier l'énergie potentielle de la valise. **Le travail apparaît encore ici comme un transfert d'énergie.**



## 5. ECHANGES ENERGETIQUES.

### 5.1. CAS DE LA CHUTE LIBRE.

On considère un solide S, de poids  $\vec{p}$ , tombant en chute libre au voisinage de la Terre (chute verticale ou chute parabolique). On applique la relation entre variation d'énergie cinétique et travail des forces dans le référentiel terrestre entre deux positions A et B. Le poids étant la seule force s'exerçant sur le solide:

On a donc:

$$E_c = E_{c(B)} - E_{c(A)} = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 = W_{AB}(\vec{p}) = m \cdot g \cdot z_A - m \cdot g \cdot z_B$$

ce qui donne:

$$\frac{1}{2} m \cdot v_B^2 + m \cdot g \cdot z_B = \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 + m \cdot g \cdot z_A$$

Les positions A et B étant quelconques, pour le solide S:

la quantité  $\frac{1}{2} m \cdot v_G^2 + m \cdot g \cdot z_G$ , est constante au cours de la chute libre. Cette expression est appelée **énergie mécanique  $E_m$** .

L'énergie mécanique apparaît comme la somme de deux termes qui ont les dimensions d'une énergie:

- $\frac{1}{2} m \cdot v^2$  représente l'**énergie cinétique  $E_c$** ;
- $m \cdot g \cdot z$  représente une énergie liée à l'altitude z du corps; l'**énergie potentielle de pesanteur  $E_p$** .

D'où  **$E_c + E_p = C^{ste}$** .

### 5.2. GENERALISATION.

Soit un solide S qui évolue dans l'environnement terrestre en étant soumis à un ensemble de forces extérieures telles que **seul le poids du solide effectue un travail non nul**. Une telle hypothèse implique une évolution de S **sans frottement**. Dans ce cas, et seulement dans ce cas, la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle de pesanteur reste constante:

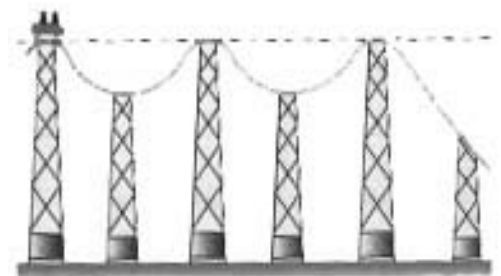
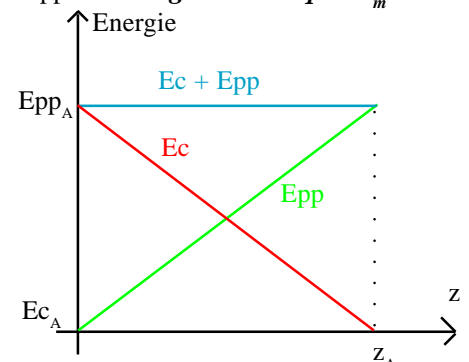
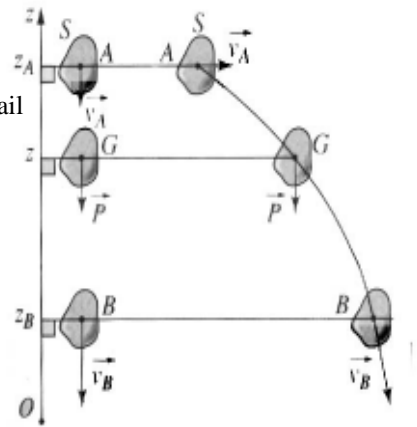
$$E_c + E_p = C^{ste}$$

**Remarque.** Si, en plus du poids  $\vec{p}$ , une force de frottement s'exerce sur le solide ou sur le système, la somme  $E_c + E_p$  ne demeure pas constante mais elle diminue.

### 5.3. TRANSFORMATIONS D'ENERGIE.

Les montagnes russes utilisent le principe de la conservation de l'énergie mécanique, dans le cas idéalisé d'un **mouvement sans frottement**. On est libre de disposer les rails de n'importe quelle façon, à condition qu'aucun point ne soit plus élevé que le point de départ. Si les voitures doivent courir librement jusqu'au but, elles pourront atteindre autant de fois qu'il le désire la hauteur de départ, mais elles ne pourront jamais la dépasser:

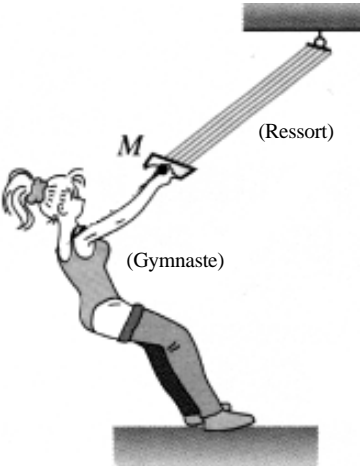

- A son point le plus élevé, la vitesse de la voiture est zéro et elle se trouve à la hauteur maximale: elle possède de l'**énergie potentielle**, mais pas d'**énergie cinétique**;
- Quand elle occupe le point le plus bas, aucune distance ne la sépare du sol et sa vitesse atteint le maximum: elle possède la plus grande **énergie cinétique**, mais aucune **énergie potentielle**.



## 6. ENERGIE INTERNE.

### 6.1. AUTRES EFFETS DU TRAVAIL.

L'énergie transférée à un corps sous forme de travail peut modifier l'énergie cinétique ou l'énergie potentielle de ce corps. Est-ce la seule conséquence ?

LE TRAVAIL RECU PAR UN CORPS PEUT:		
le déformer	élever sa température	le faire changer d'état
		
QUE SE PRODUIT-IL ?		
<p>Lorsque la gymnaste tend progressivement le ressort, elle fournit du <b>travail</b> mécanique au ressort. Le ressort se <b>déforme</b>. Les distances interatomiques et donc les <b>interactions microscopiques</b> entre les particules du matériau constituant le ressort, <b>sont modifiées</b>.</p> <p>Cette déformation permet de stocker l'énergie apportée par le travail de la force qui tend l'arc. Une partie de cette <b>énergie stockée</b> sera transmise à la gymnaste, sous forme d'énergie cinétique, lors du retour du ressort à sa forme initiale.</p>	<p>Lorsqu'une météorite pénètre dans l'atmosphère, elle devient rapidement incandescente: on observe alors une étoile filante.</p> <p>Les forces de frottement exercées par l'air sur la météorite effectuent un <b>travail</b>. Ce travail élève la <b>température</b> de la météorite.</p> <p>Or la température rend compte de l'agitation microscopique. En augmentant la température, on augmente l'agitation microscopique et donc l'<b>énergie cinétique microscopique d'agitation des particules</b>.</p>	<p>Le <b>travail</b> reçu par la neige, dû aux frottements des skis, est à l'origine de la fusion de la glace sous la semelle des skis.</p> <p>Lorsque la glace fond, il y a modification des liaisons entre les molécules. Rigidement liées dans la glace, les molécules sont libres de se déplacer dans l'eau à l'état liquide.</p> <p>Lors du <b>change-ment d'état</b>, les <b>interactions microscopiques</b> entre les molécules d'eau <b>sont modifiées</b>.</p>

Dans tous les exemples précédents, l'énergie reçue par le corps sous forme de travail a modifié les interactions microscopiques entre les particules en changeant les distances respectives.

A l'échelle macroscopique, nous avons défini pour un solide une énergie potentielle d'interaction et une énergie cinétique. De façon analogue, il est possible, à l'échelle microscopique, de définir pour les particules une énergie potentielle d'interaction et une énergie cinétique d'agitation:

L'énergie potentielle microscopique d'un système est due aux positions relatives de ces particules constitutives en interaction. Cette énergie varie lorsque les positions relatives de ces particules varient, c'est-à-dire en particulier, au cours de transformations physiques ou de réactions chimiques;

L'énergie d'agitation thermique est due à l'agitation désordonnée de particules constituant le système. Elle augmente avec la température  $T$  du système.

Cette énergie microscopique est donc d'origine cinétique (mouvement) et potentielle (positions variables).

Tout système possède donc un capital d'énergie microscopique que l'on appelle **énergie interne**.

## 6.2. ENERGIE INTERNE.

A un système dans un état donné, on peut associer une grandeur appelée *énergie interne du système*, que l'on note  $U$ .

L'énergie interne est la somme des énergies microscopiques cinétiques et potentielles d'interaction de toutes les particules constitutives du système.

L'énergie transférée à un corps sous la forme de travail peut modifier son énergie interne.

Cette énergie interne peut donc prendre diverses formes:

### - Energie thermique.

Quand la température d'un corps passe de la température  $T_1$  à la température  $T_2$  sans transformation chimique, ni changement d'état, son énergie interne varie. L'énergie thermique d'un système est l'une des formes de son énergie interne. Sa variation est liée à la variation de la température du système;

### - Energie chimique.

Lorsqu'une réaction chimique se produit dans un système, cela entraîne la modification de l'une des formes de son énergie interne, appelée énergie chimique. L'énergie stockée sous forme d'énergie chimique est sans doute l'une des plus utilisées sur Terre.

### - Energie de changement d'état.

Evaporer un liquide ou faire fondre un solide demande un apport d'énergie, souvent assuré par transfert thermique. L'énergie interne du système, initialement à l'état liquide ou solide, augmente donc lorsque celui-ci passe à l'état de vapeur ou de liquide.

### - Energie élastique.

On peut stocker de l'énergie dans un ressort en l'allongeant ou en le comprimant. Lorsqu'un ressort est inclus dans un système étudié, cette énergie élastique est une forme de l'énergie interne du système.

### Remarque.

Le transfert d'énergie sous forme de travail n'est pas la seule façon de faire varier l'énergie interne d'un corps. On peut également élever la température d'un corps tout simplement en le chauffant, ce que l'on appelle *transfert thermique* (nous aborderons cette notion dans le chapitre suivant).

