

MEC1210_Thermodynamique (Heures 5-8)

1^{er} principe de la thermodynamique (système fermé)



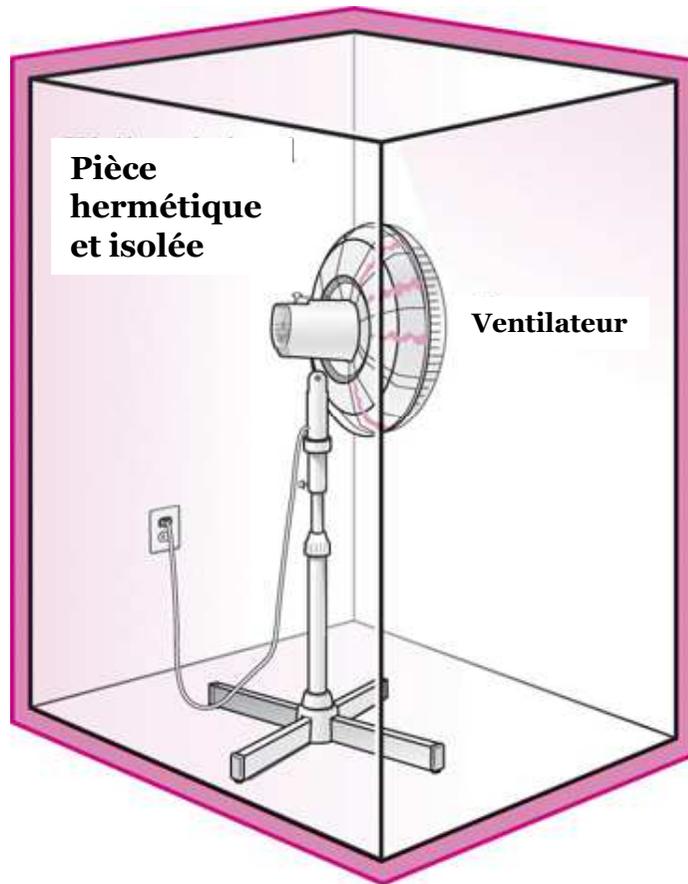
Smail Guenoun

(D'après les notes de cours de Pr.Huu Duc Vo)

Objectifs

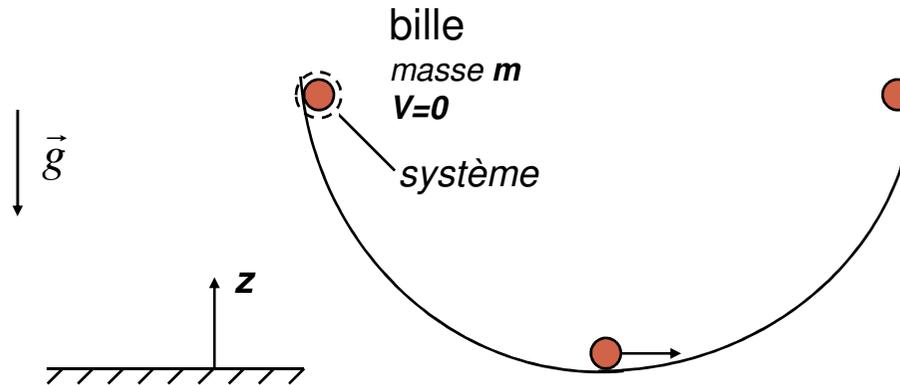
- ❖ Définir le concept de l'énergie et ses différentes formes.
- ❖ Définir et appliquer la première loi de la thermodynamique.

Introduction



La notion d'énergie

Considérons l'exemple:



Conservation de l'énergie :

$$E_{total} = E_{potentielle} + E_{cinétique} = const. \text{ (s'il n'y a pas de pertes)}$$

Considérez maintenant qu'il y ait traînée, friction (pertes) et changement de température de la bille. Il faudrait donc ajouter des termes dans cette équation, notamment:

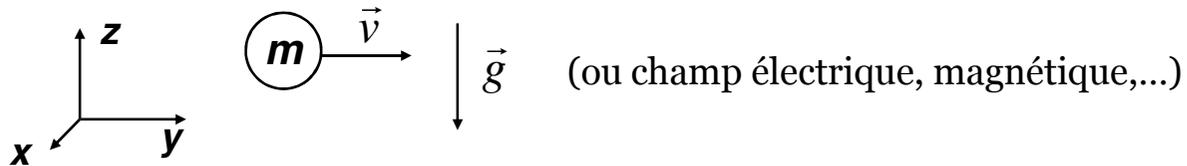
- i) Énergie interne (température)
- ii) Travail (friction, traînée)
- iii) Transfert de chaleur

Mécanismes de changement d'énergie

La notion d'énergie

Énergie macroscopique

Énergie que le système en entier possède par rapport à un système de référence.



1) Énergie cinétique

Énergie due au mouvement dans le système de référence

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (J) \quad \text{Ou par unité de masse:} \quad e_c = \frac{E_c}{m} = \frac{1}{2}v^2 \quad (J/kg)$$

2) Énergie potentielle

Énergie due à la hauteur/position d'un système dans un champ de force (gravitationnel, électrique, magnétique)

Exemples: énergie potentielle gravitationnelle (la plupart des applications en thermo.)

$$E_p = mgz \quad (J) \quad \text{ou par unité de masse:} \quad e_p = \frac{E_p}{m} = gz \quad \left(\frac{J}{kg} \right)$$

La notion d'énergie

Débit

□ La masse de fluide traversant une surface par unité de temps:

Débit massique :

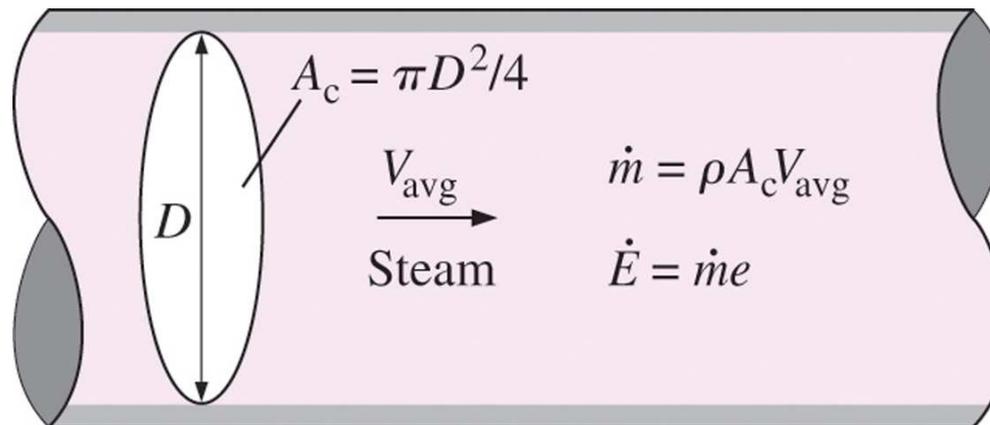
$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho A_c V_{moy} \quad (kg / s)$$

$$\dot{V} = A_c V_{moy} \quad (m^3 / s)$$

\dot{V} : Débit volumique $[m^3/s]$

A_c : Aire de la section de passage $[m^2]$

V_{moy} : Vitesse moyenne de l'écoulement $[m/s]$



La notion d'énergie

Exemple 1

Une voiture accélère de 0 à 85 km/h en 10s. L'énergie fournie à la voiture serait-elle différente si elle était accélérée en 5s? Et la puissance?

Exemple 2

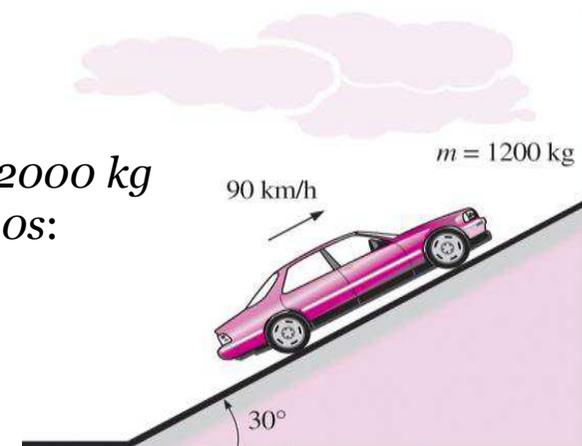
Déterminez l'énergie requise pour accélérer une voiture de 800 kg de 0 à 100 km/h sur une chaussée horizontale

Réponse : 309 kJ

Exemple 3

Déterminer la puissance moyenne requise pour qu'une voiture de 2000 kg puisse parcourir 100 m le long d'une pente ascendante de 30° en 10s:

- À vitesse constante
- De zéro à une vitesse finale de 30m/s

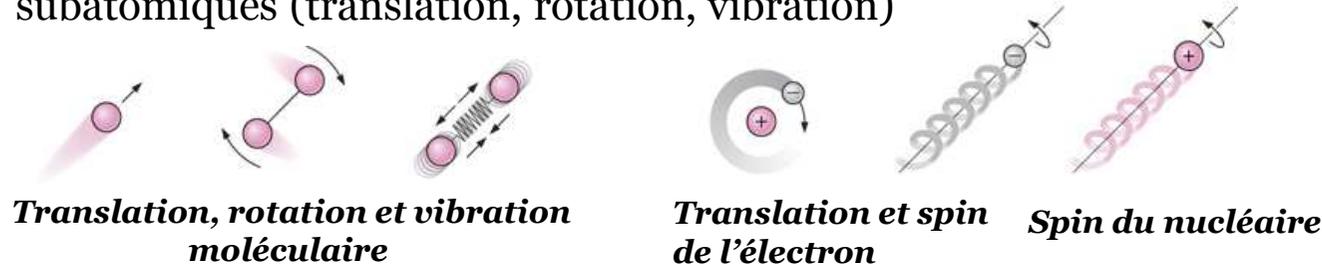


La notion d'énergie

Énergie microscopique (interne)

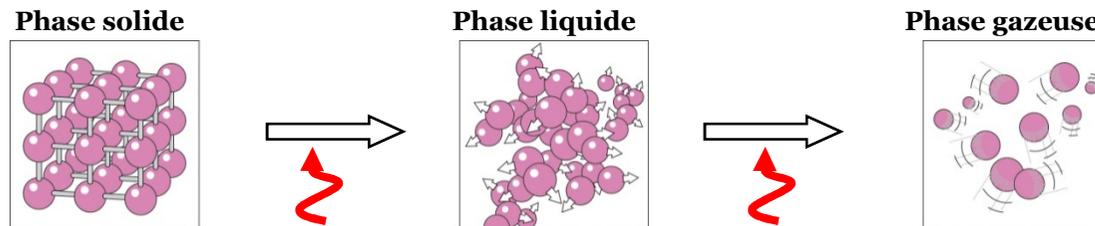
Énergie liée à la structure et l'activité moléculaire du système. Cette énergie, qu'on appelle aussi l'énergie interne, est dénotée par U (et $u=U/M$).

1) **Énergie sensible** : Énergie cinétique due aux mouvements des molécules/atomes/particules subatomiques (translation, rotation, vibration)



U augmente avec la température

2) **Énergie latente** : Énergie associée aux forces liant les molécules dans une phase d'un système. Cette énergie est dégagée ou absorbée lors d'un changement de phase.



Énergie fournie pour annuler les forces liant les molécules d'une substance dans une structure caractérisant une phase

Énergie interne ↑

La notion d'énergie

3) **Énergie chimique** : Énergie associée aux liaisons atomiques (partage d'électrons entre atomes) qui est absorbée/dégagée lors du changement de liaisons (réactions chimiques).

4) **Énergie nucléaire**: Énergie associée aux forces de liaison dans le noyau de l'atome.

Notes:

❖ **Énergie totale** d'un système est la somme des énergies potentielle, cinétique et internes:

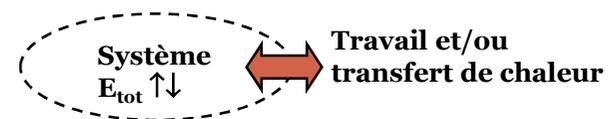
$$E_{tot} = E_c + E_p + U \quad [Joule] = [N*m]$$

❖ Pour la plupart des applications en thermodynamique, U ne comprend que l'énergie sensible et latente, que l'on regroupe sous le nom d'**énergie thermique**, car elles sont associées au transfert de chaleur.

❖ **Qualité de l'énergie**:

- l'énergie macroscopique est 'organisée' (énergie de **haute qualité**).
- l'énergie cinétique microscopique (sensible) est 'désorganisée' (multidirectionnelle) (difficile à y extraire du travail, donc **basse qualité**).

❖ L'**énergie** est une **propriété** (alors fonction de l'**état** du système), qui peut être changée par **deux** méthodes: **travail** et **transfert de chaleur**



Transfert d'énergie

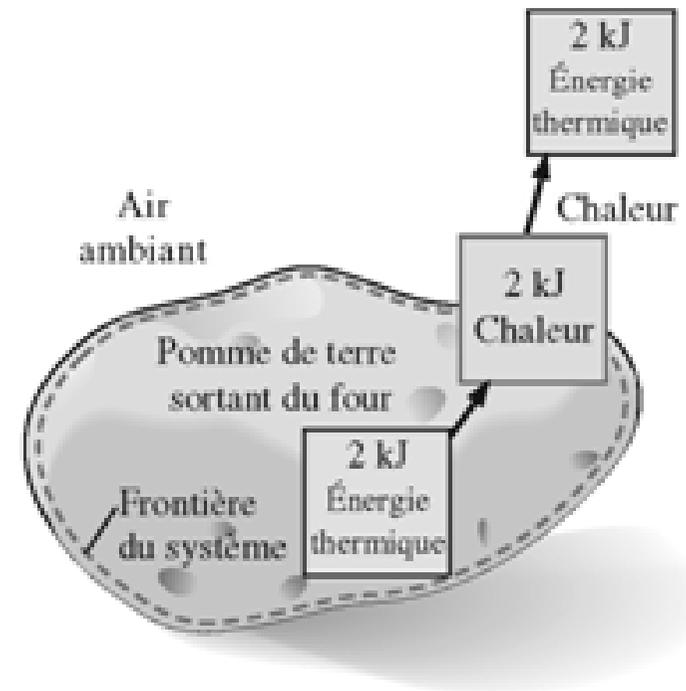
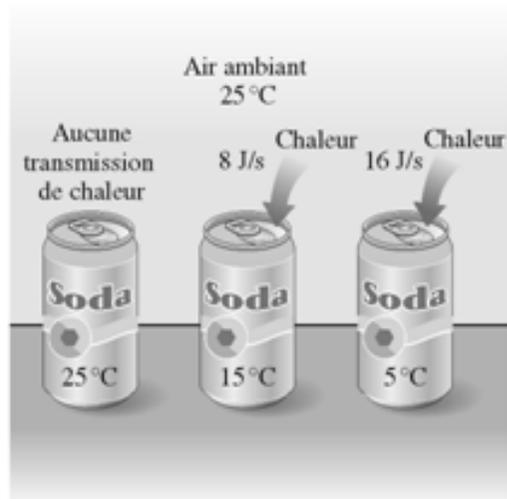
Il existe **deux modes** de transfert d'énergie: transfert par la chaleur et par le travail.

1) La chaleur :

Se transmet d'un milieu à un autre grâce à une différence de température.

❖ Ce transfert est dénoté par Q , dont l'unité en SI est le [*Joule*] (même unité que l'énergie) :

- Positive si ajoutée à un système (*chaudière*)
- Négative si dissipée par le système (*condenseur*)
- La chaleur dépend du chemin suivi



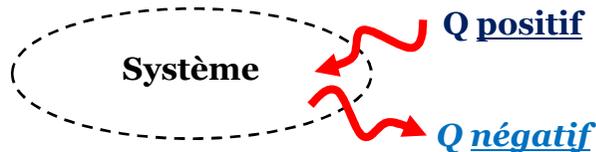
Transfert d'énergie

- **Chaleur transmise par unité de masse:** $q = \frac{Q}{m}$ (kJ / kg)

- **Taux de transmission de chaleur est:** $Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt$ (kJ)

Avec: $\dot{Q} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}$ [J/s] ou [W]

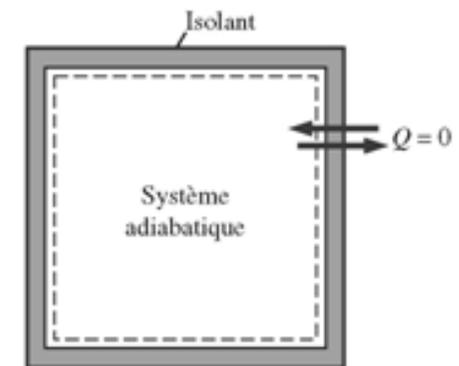
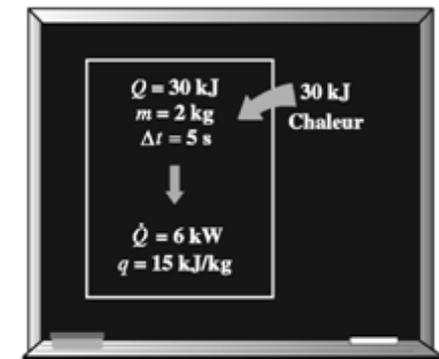
- **Convention de signes:**



Note :

✓ Lorsqu'il n'y a pas de transfert de chaleur, on parle d'évolution **adiabatique**.

✓ En thermodynamique, quand l'interaction du système avec l'environnement n'est pas le transfert de chaleur (c'est-à-dire due à une différence de température), **c'est du travail**.



Transfert d'énergie

Mécanismes de transfert de chaleur

- 1) **Conduction** : Transmission de chaleur par contact entre deux éléments.
- 2) **Convection**: Transfert de chaleur entre une surface solide et un fluide adjacent en mouvement (fluide ou gaz).



- 3) **Radiation** : Transfert d'énergie par radiation électromagnétique.
Exemple: chaleur ressentie par la peau sous l'effet de rayons solaires ou près d'un feu.

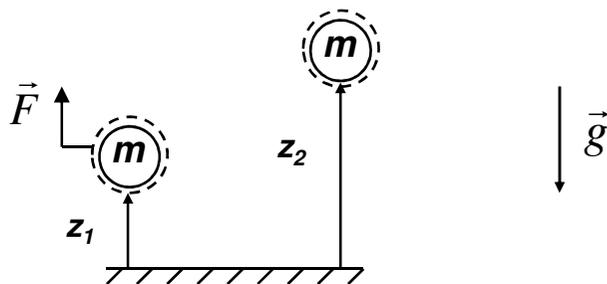
Transfert d'énergie

2) Travail

Mécanisme de transfert d'énergie dont le seul résultat équivalent aurait pu être l'élévation d'une masse. Ce transfert est dénoté par W , dont l'unité en SI est le [Joule] (même unité que l'énergie).

Travail = force x déplacement (point de vue mécanique)

exemple 1: Élévation d'une masse

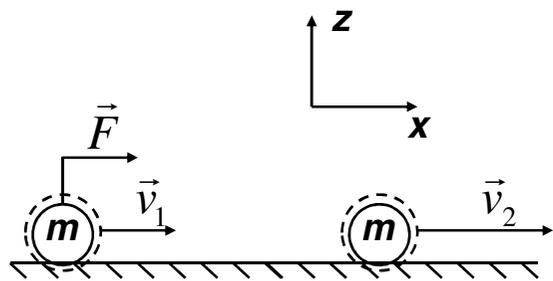


$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{1 \rightarrow 2} F dz = \int_{z_1}^{z_2} mg dz = mg(z_2 - z_1)$$

$$W_{1 \rightarrow 2} = \Delta E_{\text{potentielle, sys } 1 \rightarrow 2}$$

Transfert d'énergie

exemple 2: Accélération d'une masse

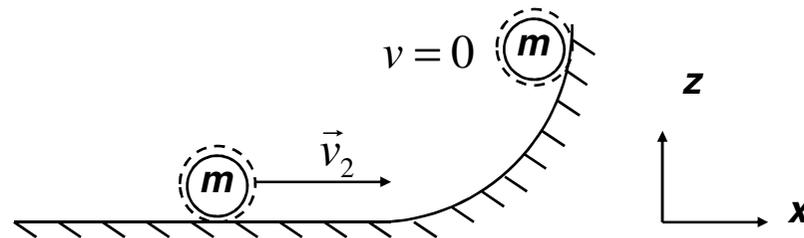


$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{1 \rightarrow 2} F dx = \int_{1 \rightarrow 2} m a dx = \int_{1 \rightarrow 2} m \frac{dv}{dt} dx = \int_{1 \rightarrow 2} m dv \frac{dx}{dt}$$

$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{v_1}^{v_2} m v dv = m \left[\frac{v^2}{2} \right]_{v_1}^{v_2} = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2)$$

$$W_{1 \rightarrow 2} = \Delta E_{\text{cinétique, sys } 1 \rightarrow 2}$$

Notons que l'on peut convertir ce travail pour soulever une masse (définition du travail)



Transfert d'énergie

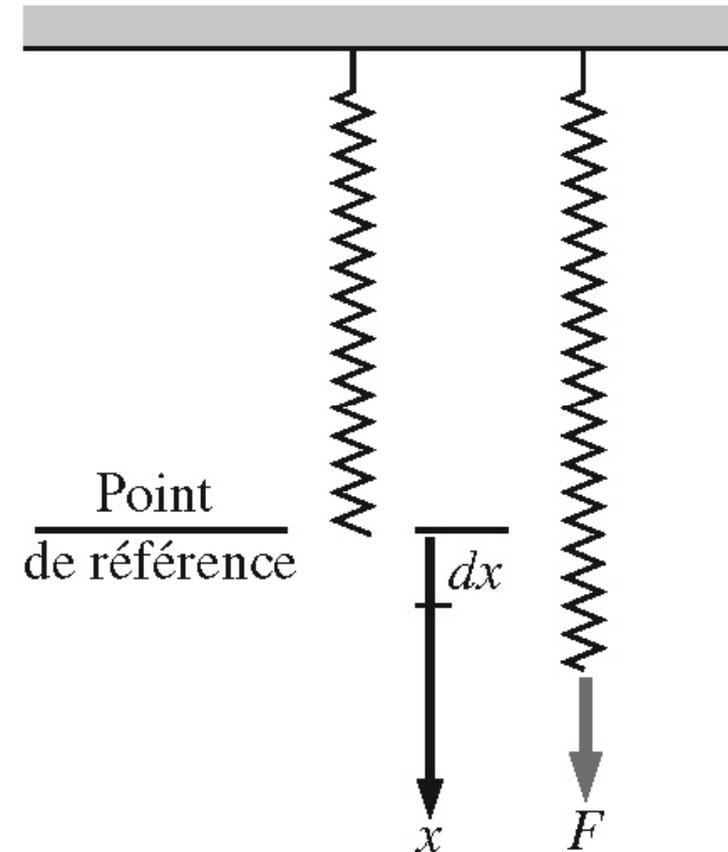
Exemple 3: Travail d'un ressort

❖ **Force de rappel** exercée lors de la compression ou l'élongation d'un ressort :

$$F=kx$$

❖ **Travail** fait lors de la compression ou l'élongation d'un ressort :

$$W = \int_2^1 F dx = \int_2^1 kx dx = \frac{1}{2} k (x_2^2 - x_1^2)$$



Transfert d'énergie

Types de travail

1) Mécanique :

$$\text{Travail} = \begin{cases} W = \text{force}(F) * \text{déplacement}(s) \\ \text{Ou} \\ W = \text{couple}(T = F * r) * \text{déplacement angulaire}(\theta) \end{cases}$$

$$\text{Puissance : } \begin{cases} \dot{W} = \text{force}(F) * \text{vitesse}(v) \\ \text{Ou} \\ \dot{W} = \text{couple}(T = F * r) * \text{vitesse angulaire}(\omega) \end{cases}$$
$$\dot{W} \equiv \frac{dW}{dt}$$

Transfert d'énergie

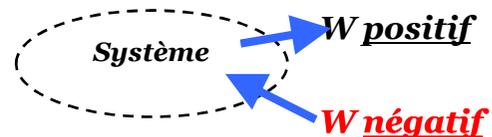
2) Électrique :

Travail : W = différence de voltage (V) \times nombre de charges électriques (N)

Puissance : $\dot{W} \equiv \frac{dW}{dt} = V * I$

3) **Autres**: magnétique (même équivalence mécanique que pour travail électrique)

Convention de signes :

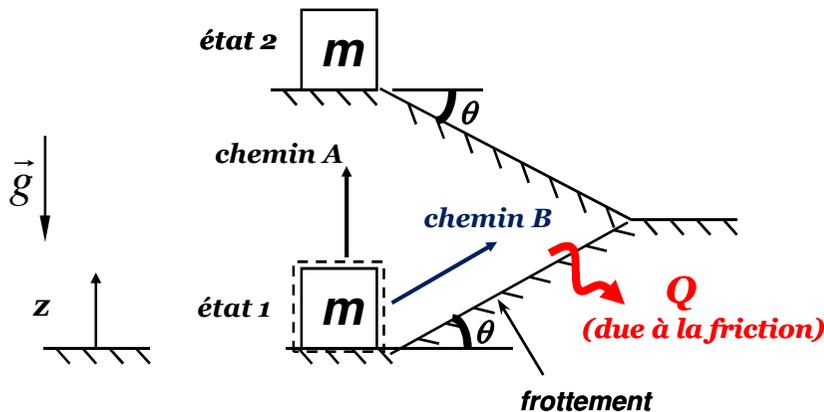


Le transfert d'énergie

Note :

❖ Contrairement à l'énergie, le travail et le transfert de chaleur ne sont **pas** des propriétés, mais dépendent plutôt des détails de l'interaction du système avec l'environnement. Prenons l'exemple ci-dessous:

états 1 → 2: $\Delta E_{1 \rightarrow 2} = \int_{1 \rightarrow 2} dE = E_2 - E_1 = E_{p2} - E_{p1} = mg(z_2 - z_1)$



Chemin A:
$$\begin{cases} W_{1-2} = \int_A \delta W = \int_{z_1}^{z_2} mg dz = mg(z_2 - z_1) \\ Q_{1-2} = 0 \end{cases}$$

Chemin B:
$$\begin{cases} W_{1-2} = \int \delta W = \int_{z_1}^{z_2} (mg \sin \theta + F_{friction}) \frac{dz}{\sin \theta} = mg(z_2 - z_1) + W_{friction} \\ Q_{1-2} = W_{friction} \end{cases}$$

❖ Énergie, étant une propriété, dépend de l'état et non des détails de l'interaction avec l'environnement (évolution). On dénote donc un petit changement d'énergie par dE . Par ailleurs, W et Q dépendent de ces détails. On doit donc dénoter un petit travail et un petit transfert de chaleur par δW et δQ , respectivement.

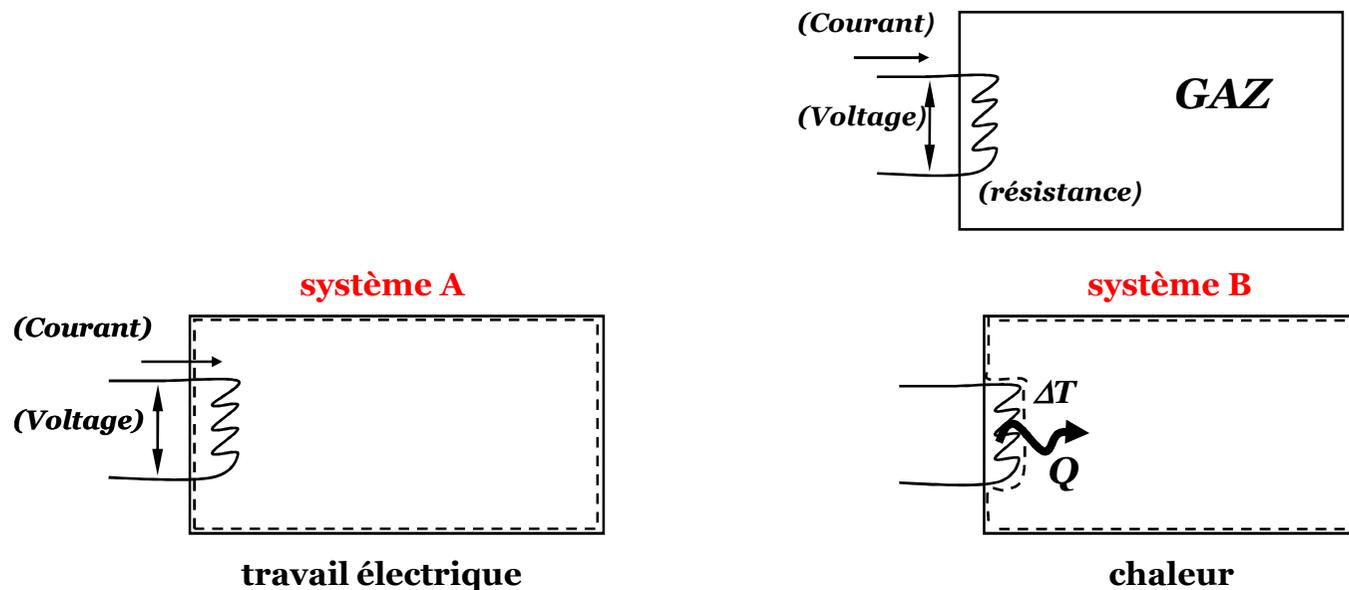
Transfert d'énergie

Notes (Suite)

- La chaleur et le travail sont des interactions traversant la frontière du système. Il faut donc regarder à la frontière pour déterminer leur nature.

Chaleur ou travail?

La réponse peut dépendre du choix du système; regarder ce qui traverse la frontière du système choisi.



Transfert d'énergie

Exemple 2.3

Une bougie brule dans une pièce isolée thermiquement. En considérant la pièce (l'air plus la bougie) comme le système, déterminez:

- 1) S'il ya transmission de chaleur pendant la combustion de la bougie
- 2) Si l'énergie interne du système change

Isolant

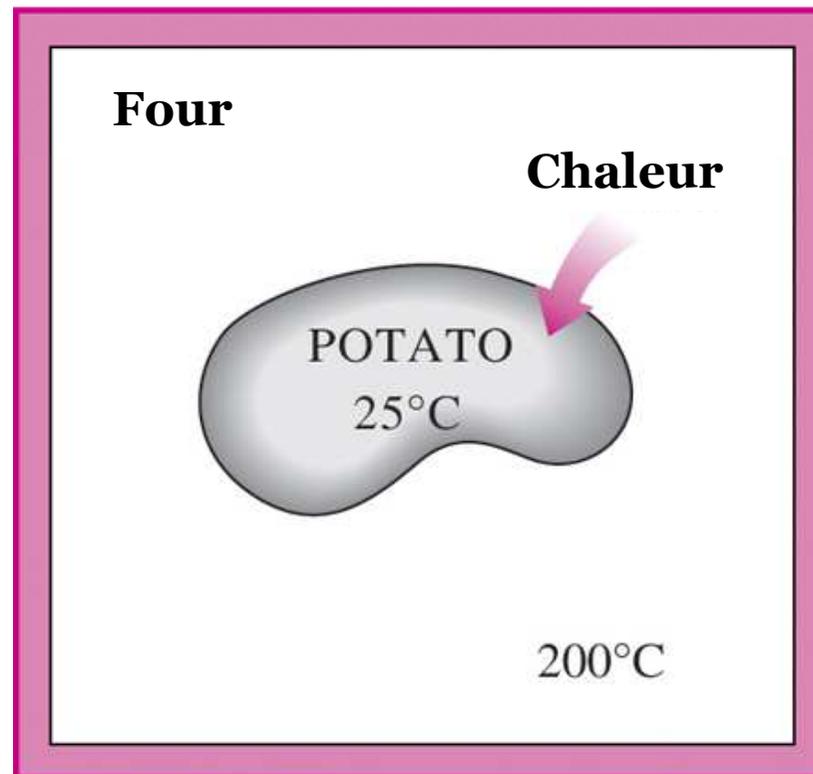


Transfert d'énergie

Exemple 2.4

Une pomme de terre ayant une température initiale de 25°C est cuite dans un four dont la température atteint 200°C . Y a-t-il transmission de chaleur durant la cuisson

Isolant

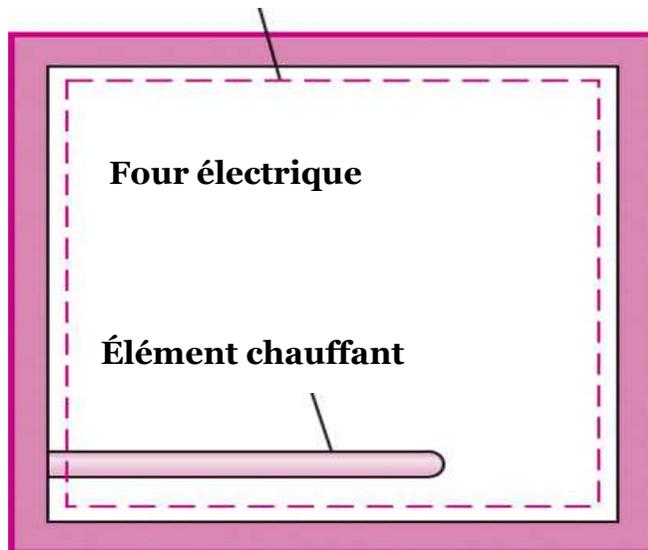


Transfert d'énergie

Exemple 2.5:

Un four isolé thermiquement est chauffé par un élément électrique interne. Si on définit le système comme étant le four, y compris l'élément chauffant, déterminez s'il ya transmission de chaleur ou de travail.

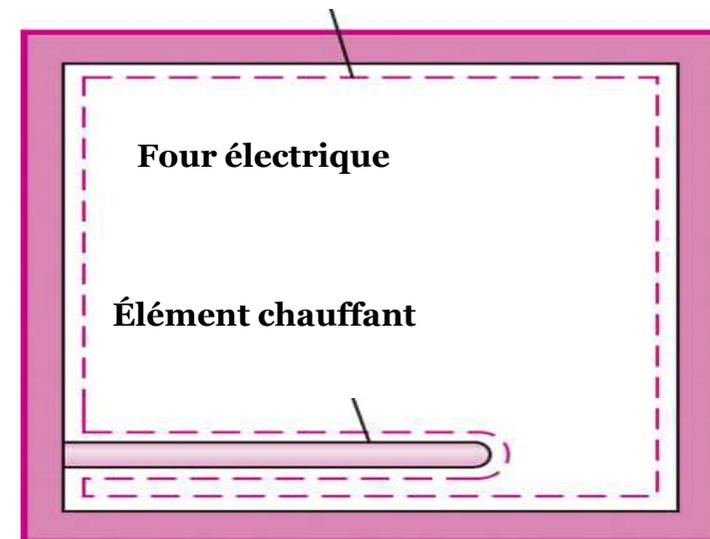
Frontières du système



Exemple 2.6:

Inclure maintenant l'élément chauffant du système

Frontières du système



Premier principe de la thermodynamique

➤ " **Le premier principe de la thermodynamique** stipule que, durant l'évolution, l'énergie ne peut être produite ni détruite"

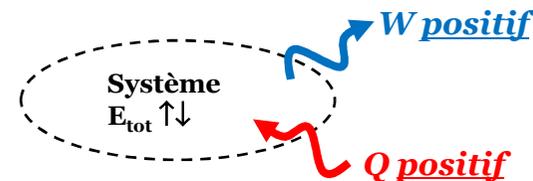
- ✓ Elle n'est convertie que d'une forme à une autre
- ✓ Principe de la **conservation de l'énergie**

➤ **Donc**, Le changement de l'énergie d'un système est égal à la différence entre le transfert de chaleur **au** système et le travail fait **par** le système.

$$\Delta E_{tot,sys} = Q_{(au\ sys)} - W_{(par\ sys)}$$

Avec : $E_{tot} = E_c + E_p + U$

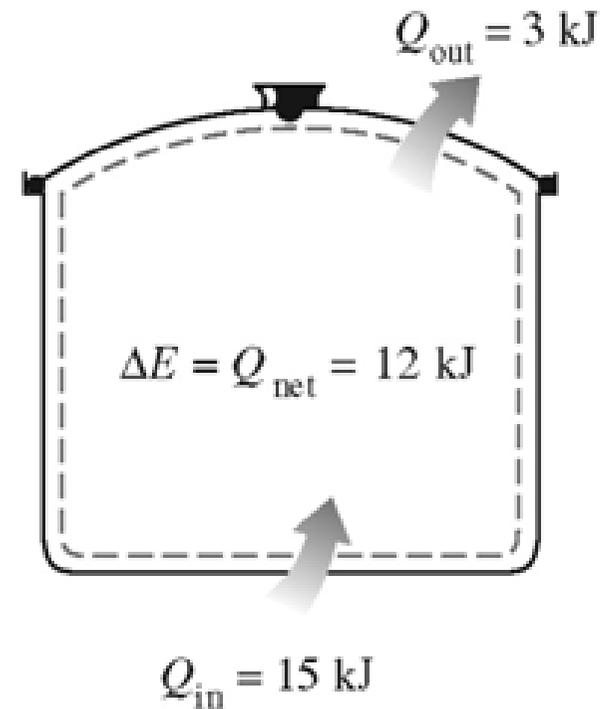
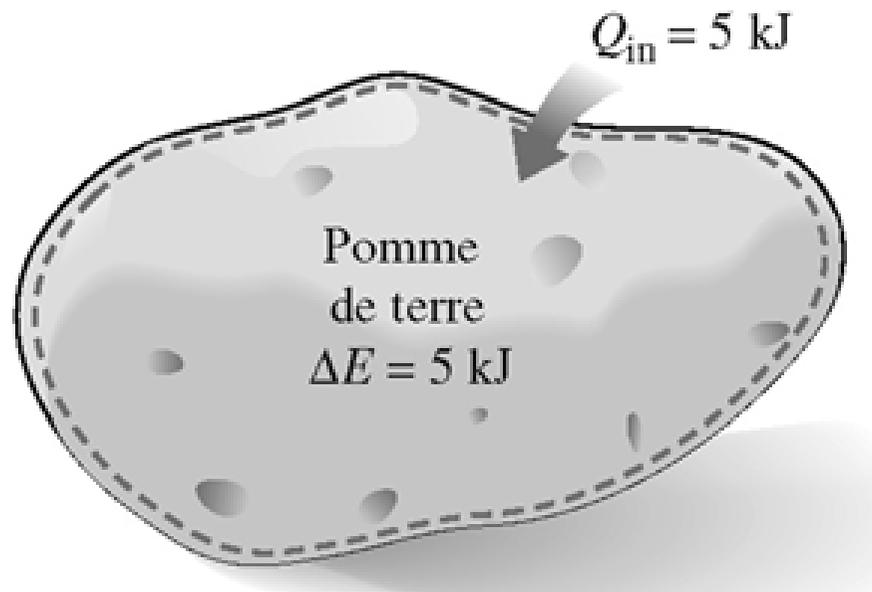
Taux : $\dot{E}_{tot,sys} = \dot{Q} - \dot{W}$



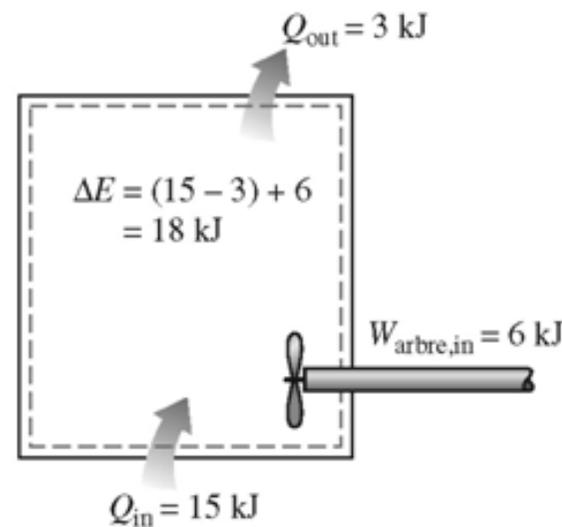
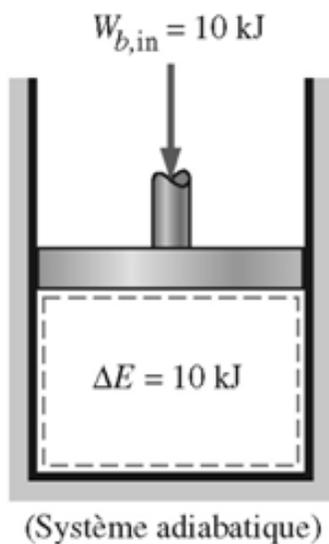
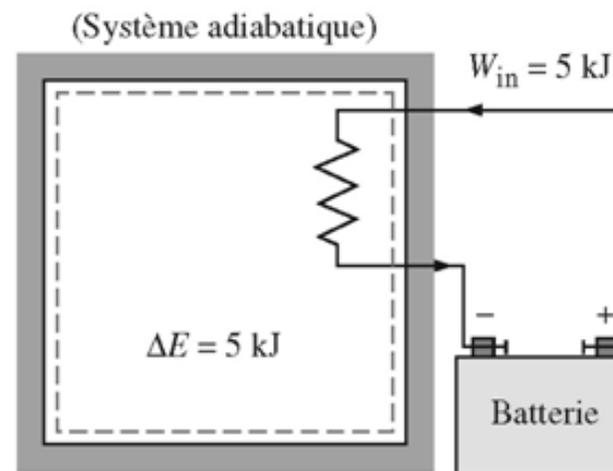
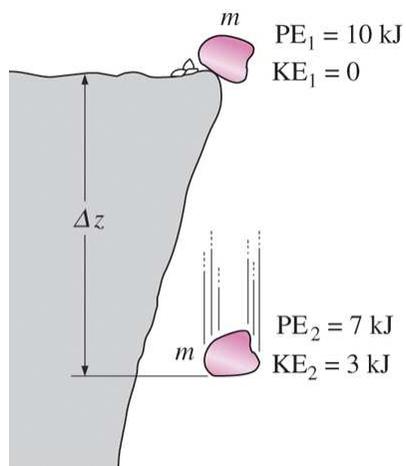
Notes:

- Pour les systèmes stationnaires : $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$, **donc** : $\Delta E_{tot,sys} = \Delta U$
- Pour les cycles: $\Delta E_{tot,sys} = 0$, **donc**: $W = Q$

Premier principe de la thermodynamique



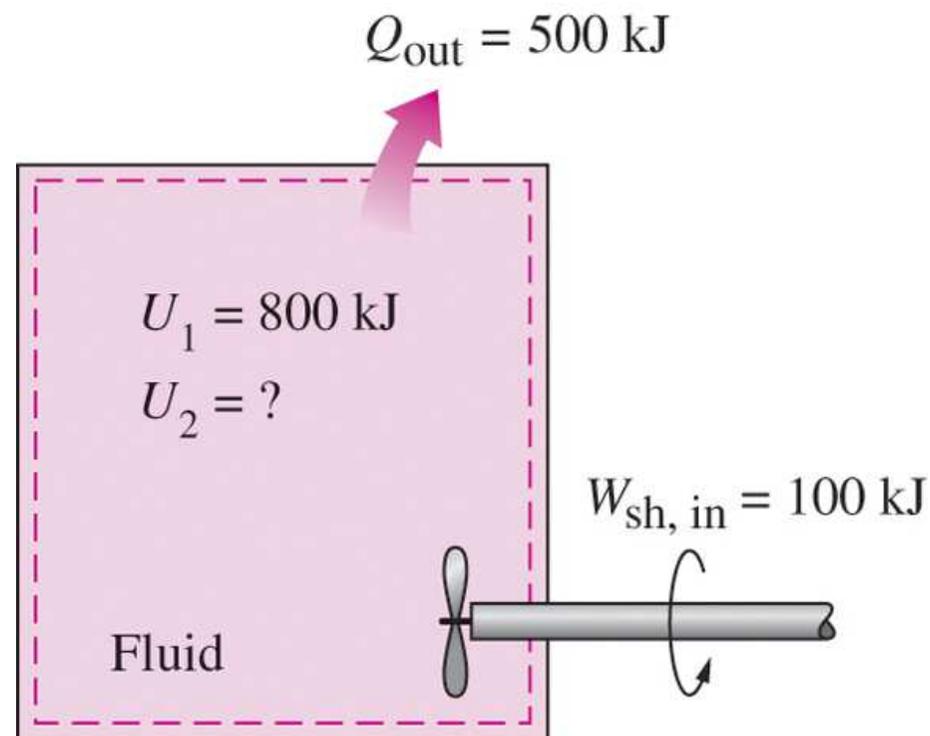
Premier principe de la thermodynamique



Premier principe de la thermodynamique

Exemple 2.10 du livre

Q: L'énergie interne finale du fluide ?

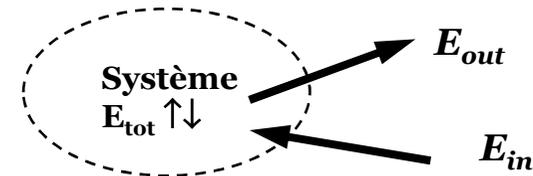


Premier principe de la thermodynamique

Le bilan d'énergie

$$\left(\begin{array}{c} \text{Variation de l'énergie} \\ \text{totale du système} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Énergie totale} \\ \text{entrante} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Énergie totale} \\ \text{sortante} \end{array} \right)$$

$$\Delta E_{\text{système}} = E_{in} - E_{out}$$



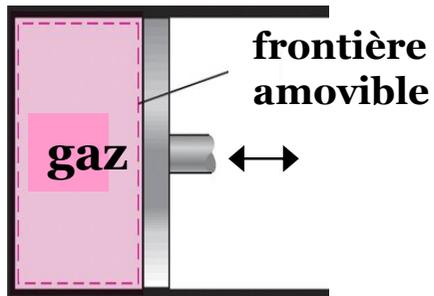
❖ Pour un système : $\Delta E_{\text{système}} = E_{final} - E_{initial}$

❖ La variation de l'énergie totale au cours d'une évolution:

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta U + \Delta E_{\text{cinétique}} + \Delta E_{\text{potentielle}} \\ &= m(u_2 - u_1) + \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) + mg(z_2 - z_1) \end{aligned}$$

Bilan d'énergie

Systeme fermé



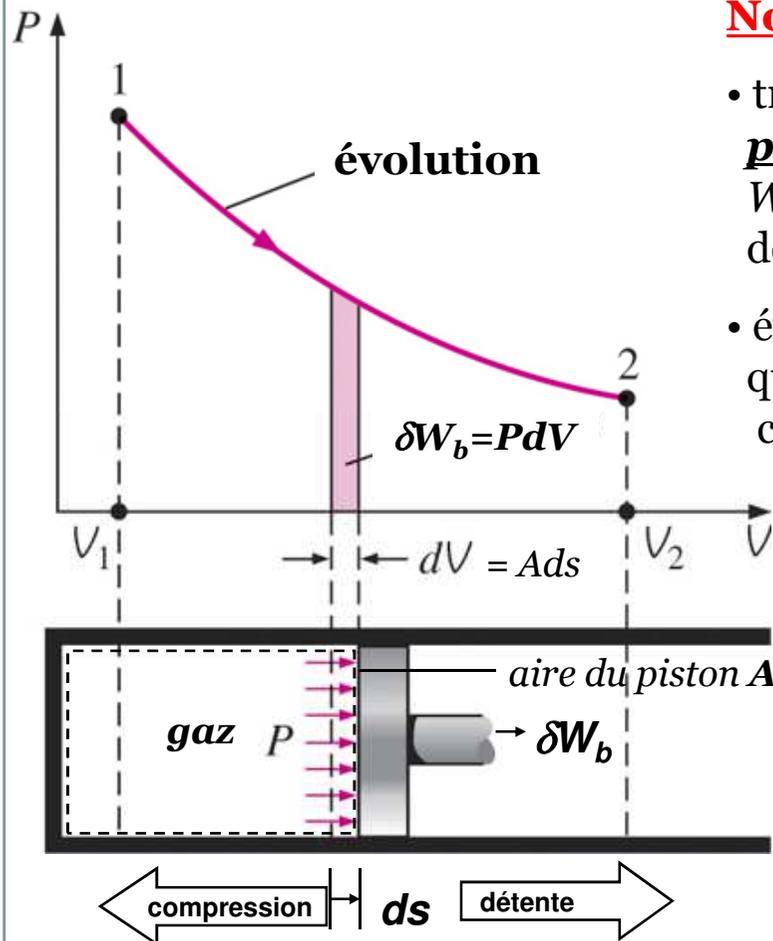
Premier principe (différents formats):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta E_{tot,sys} = Q_{(au\ sys)} - W_{(par\ sys)} \\ \Delta e_{tot,sys} = q - w \\ \dot{E}_{tot,sys} = \dot{Q} - \dot{W} \end{array} \right.$$

$$W = \underbrace{W_b}_{\text{Travail}} + W_{autres} \longrightarrow \text{autres travaux (mécaniques, électriques, magnétiques, ...)}$$

Travail de frontière: travail mécanique associé au mouvement de la frontière

Bilan d'énergie



Notes:

- travail de détente ($V_{final} > V_{initial} : W_b > 0$, travail **par** système) et de compression ($V_{final} < V_{initial} : W_b < 0$, travail **sur** système). Donc les limites de l'intégral PdV prendront soin du signe de W_b .
- évolution doit être quasi-statique (accélération $\cong 0$) pour que la pression P du système soit uniforme et par conséquent que les états **entre** 1 et 2 soient définis

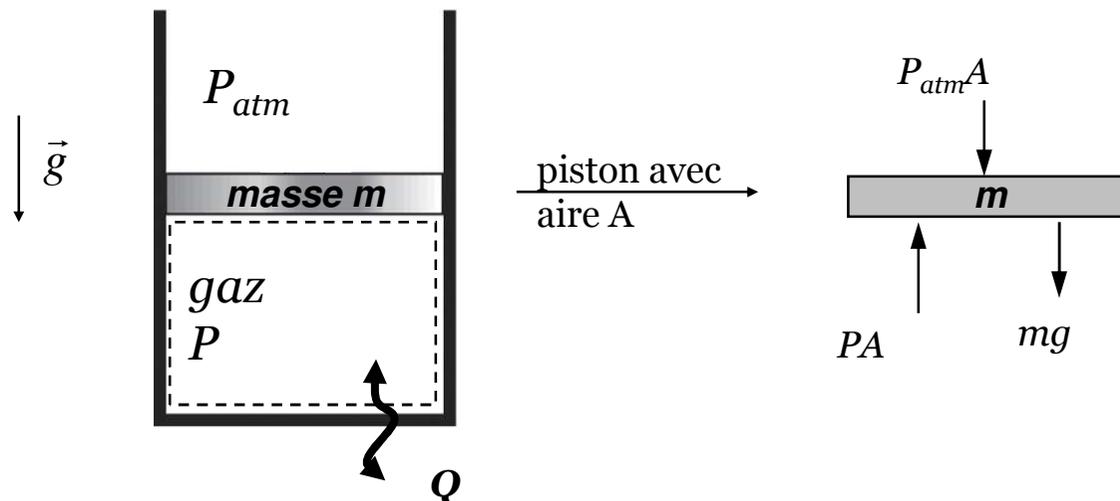
$$\delta W_b = \text{force} \cdot \text{déplacement} = F \cdot ds = PA \cdot ds = PdV$$

$$W_b = \int_{\text{état 1}}^{\text{état 2}} \delta W_b = \int_{V_1}^{V_2} PdV = \text{aire sous la courbe P-V entre états 1 et 2}$$

Bilan d'énergie

Pour évaluer W_b , il faut connaître la fonction $P=f(V)$, qui dépend de l'évolution.
Voici quelques évolutions communes (pour lesquelles on connaît $P=f(V)$) et le travail W_b associé:

1) **Évolution isobarique** (pression constante)



$$\sum F_z = PA - P_{atm}A - mg = ma = 0 \quad (\text{quasi - statique : } a \cong 0)$$

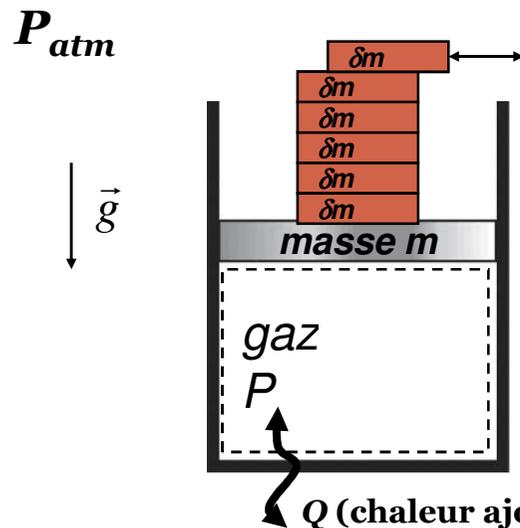
$$P = P_{atm} + \frac{mg}{A} = \text{const.} \equiv P_o$$



$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} P dV = P_o \int_{V_1}^{V_2} dV = P_o (V_2 - V_1)$$

Bilan d'énergie

2) Évolution isothermique (température constante) pour un gaz parfait



Q (chaleur ajoutée/retirée pour garder la température constante au fur et à mesure qu'on réduit/augmente la pression en enlevant/ajoutant des petites masses δm)

Pour un gaz parfait :

$$PV = NR_u T = \text{const.} \equiv C$$

$$P = \frac{C}{V} \rightarrow C = P_1 V_1$$

$$P = \frac{P_1 V_1}{V}$$

$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} P dV = C \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = C [\ln V]_{V_1}^{V_2} = C (\ln V_2 - \ln V_1) = C \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\rightarrow W_b = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Bilan d'énergie

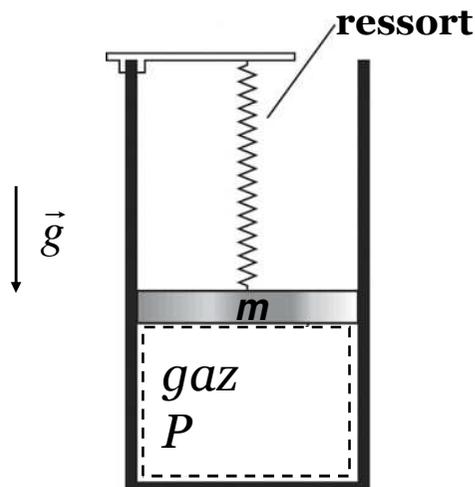
3) Évolution polytropique ($PV^n = \text{constant}$)

$$PV^n = \text{const.} = C = P_1V_1^n = P_2V_2^n$$

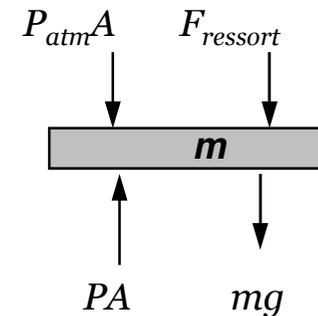
$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} PdV = C \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n} = C \left[\frac{V^{-n+1}}{-n+1} \right]_{V_1}^{V_2} = \frac{1}{1-n} (CV_2^{1-n} - CV_1^{1-n}) = \frac{1}{1-n} (P_2V_2^nV_2^{1-n} - P_1V_1^nV_1^{1-n})$$

$$W_b = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n} \quad (n \neq 1)$$

4) Expansion/compression contre un ressort



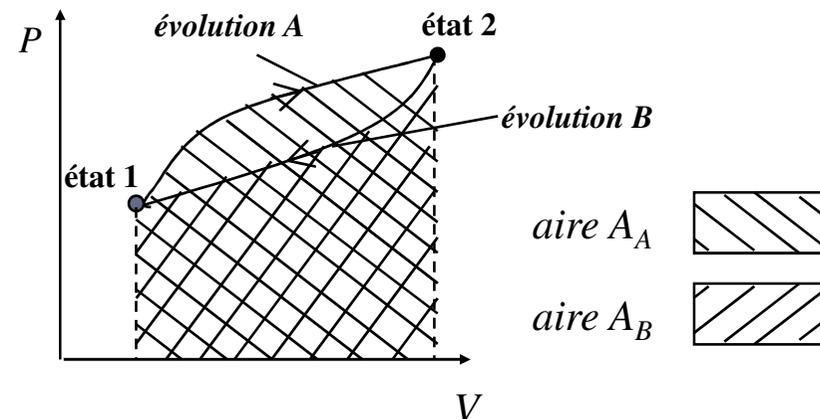
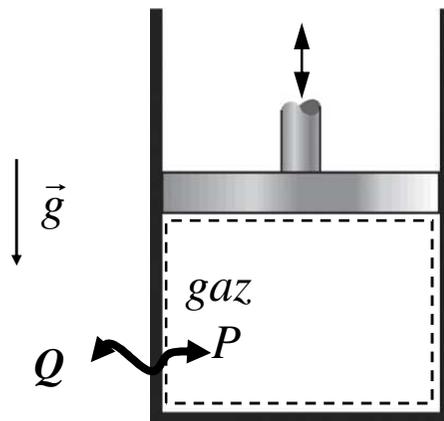
Pour trouver $P=f(V)$:



Bilan d'énergie

Note: pour un cycle, le travail net est égal à l'aire nette sous la courbe P-V

Par exemple:



notez que A_A et A_B sont des aires, donc des quantités positives

$$W_{cycle} = W_A + W_B = \int_{V_1(\text{évol. A})}^{V_2} PdV + \int_{V_2}^{V_1} PdV = W_A + W_B = \overbrace{A_A + (-A_B)} = A_A - A_B$$

Bilan d'énergie

Exemple

Soit le cylindre-piston de la figure ci-dessous contenant un gaz de masse m_g , on chauffe le système et le piston monte ce qui fait comprimer le ressort (initialement au repos) de z_1 à z_2 .

On demande de calculer :

- La pression dans le cylindre (initiale et finale), P
- Le travail de frontière, W_b (en kJ)
- La chaleur transmise, Q (en kJ)

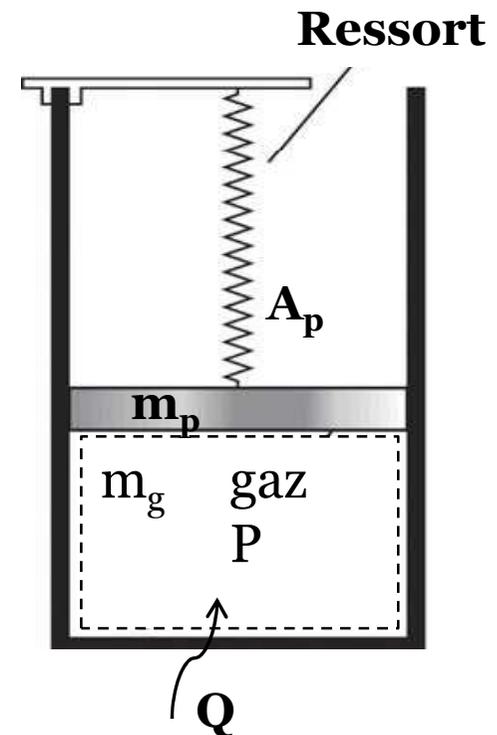
On donne:

$k=10 \text{ kN/m}$, $P_a=100 \text{ kPa}$, $A_p=7,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,

$m_p=10 \text{ kg}$, $m_g=5 \times 10^{-4} \text{ kg}$

$u_1=214 \text{ kJ/kg}$, $u_2=337 \text{ kJ/kg}$, $z_1=0$, $z_2=5 \times 10^{-2} \text{ m}$

On peut supposer que l'évolution est quasi-statique et on peut aussi négliger tout changement d'énergie cinétique ou potentielle du gaz.



Lecture suggérée

Sections **2.1 à 2.6, 4.1, 4.2** du livre, «**Thermodynamique, une approche pragmatique**», Y. Cengel, M. Boles, M. Kanoğlu et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2019.