

# MEC1210 THERMODYNAMIQUE

ENSEIGNANT: RAMDANE YOUNSI  
BUREAU: C-318.1  
TELEPHONE: (514)340-4711 ext. 4579  
COURRIEL: ramdane.younsi@polymtl.ca

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

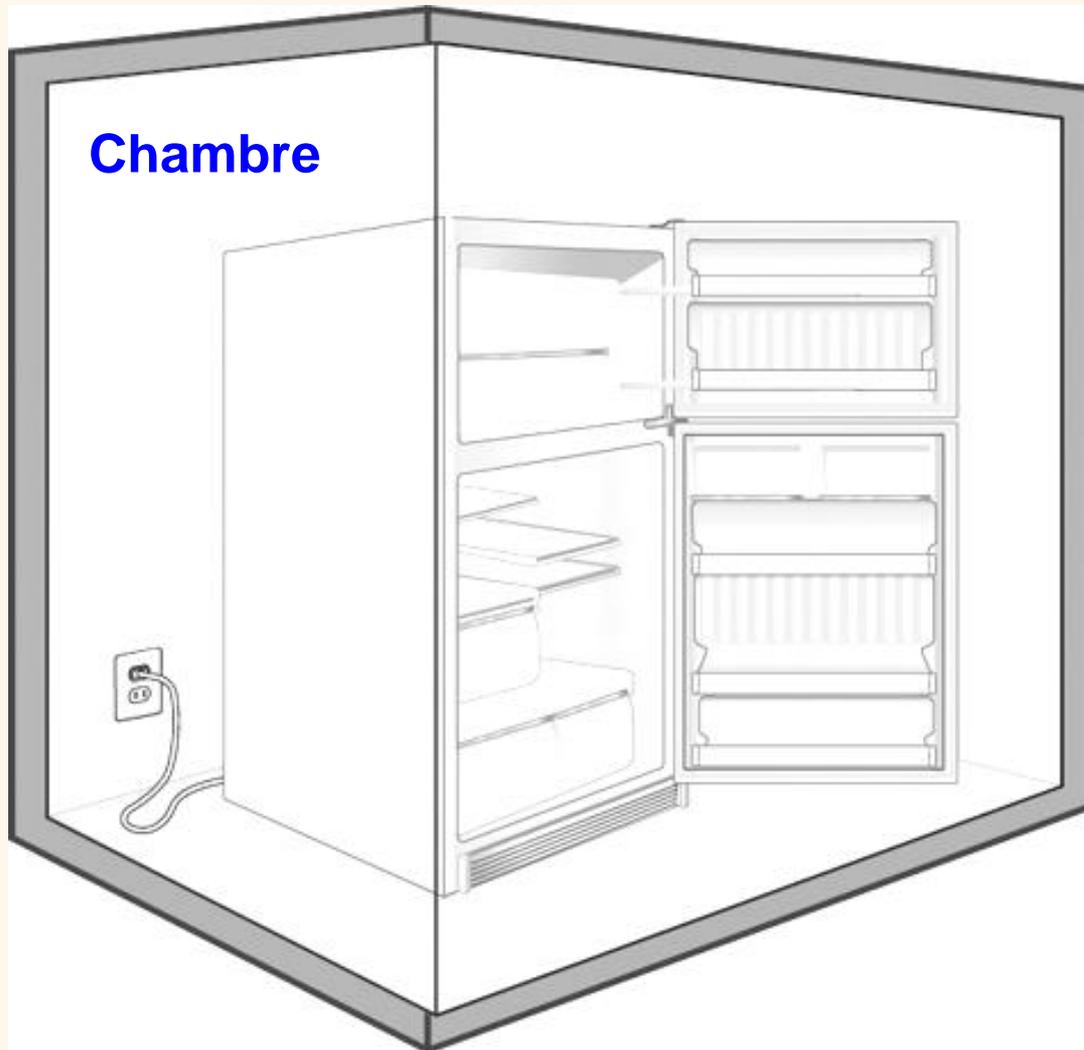
# Chapitre 3:

## 1er principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

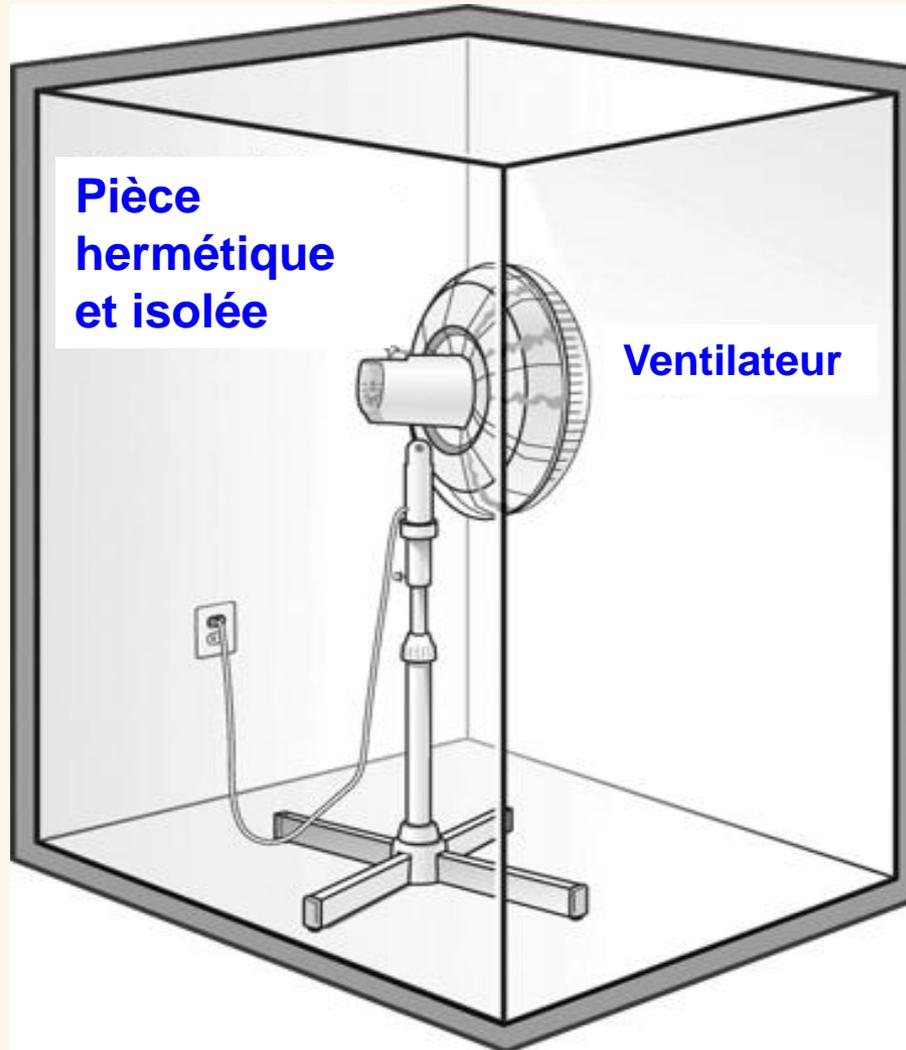
### OBJECTIFS

- Définir le concept d'énergie et ses diverses formes.
- Définir la notion de chaleur et présenter ses principaux phénomènes de transmission.
- Définir le travail et ses différentes formes.
- Présenter la 1<sup>ère</sup> loi de la thermodynamique.
- Étudier le travail de frontière déformable
- Maîtriser l'analyse des bilans dans les systèmes fermés

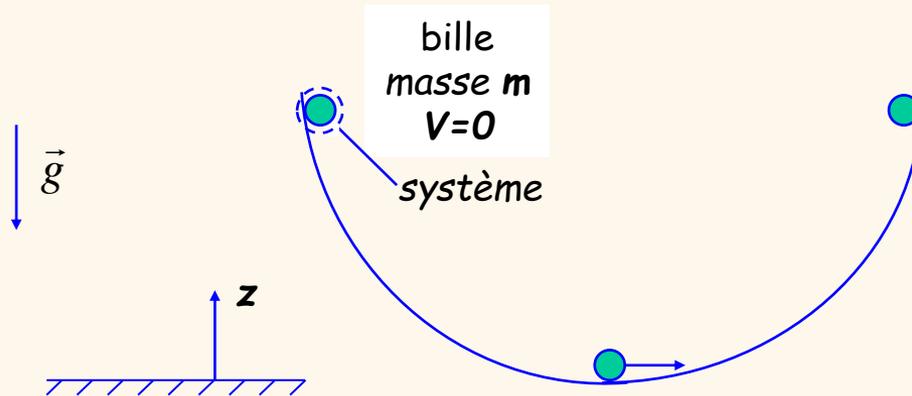
La pièce se refroidit ou se réchauffe?



# La pièce se refroidit ou se réchauffe?



Considérons l'exemple:



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

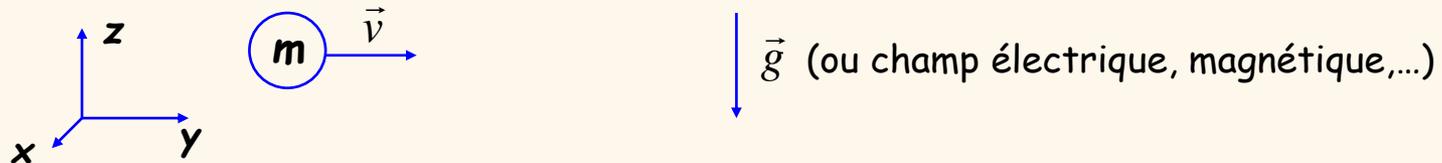
Considérez maintenant qu'il y ait traînée, friction (pertes) et changement de température de la bille. Il faudrait donc ajouter des termes dans cette équation, notamment:

- i) Énergie interne (température)
  - ii) Travail (friction, traînée)
  - iii) Transfert de chaleur
- } Mécanismes de changement d'énergie

# 1) Les formes d'énergie

## a) Énergie macroscopique

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



### i) Énergie cinétique

Énergie due au mouvement dans le système de référence

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad \mathbf{J} \qquad e_c = \frac{E_c}{m} = \frac{1}{2}v^2 \quad \mathbf{J/kg}$$

### ii) Énergie potentielle

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

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

$$E_p = mgz \quad \mathbf{J} \qquad e_p = \frac{E_p}{m} = gz \quad \mathbf{J/kg}$$

### Exemple 1

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

Réponse: ( en classe)

### Exemple 2

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

Réponse ( en classe): 309kJ

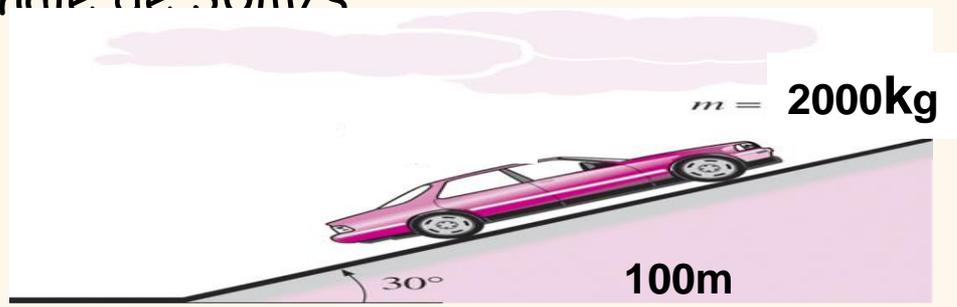
### Exemple 3

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

- a) A vitesse constante
- b) De zéro à une vitesse finale de 30m/s

Réponse: ( en classe)

- a) 98.1kW
- b) 188kW

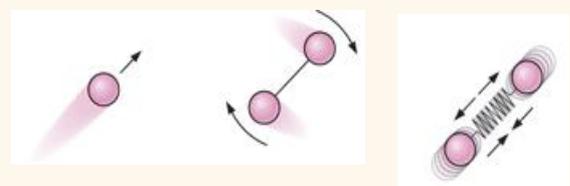


## b) Énergie microscopique (interne)

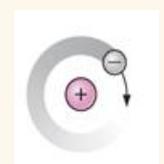
Énergie liée à la structure et l'activité moléculaire du système. Cette énergie, qu'on appelle aussi l'énergie interne, est dénotée par  $U$  (et  $u=U/M$ ).

### i) Énergie sensible

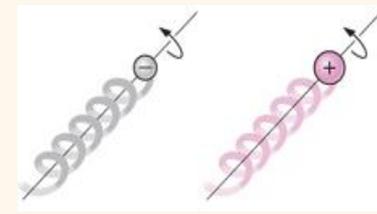
Énergie cinétique due aux mouvements des molécules/atomes/particules subatomiques (translation, rotation, vibration)



Translation, rotation et vibration moléculaire



Translation et spin de l'électron

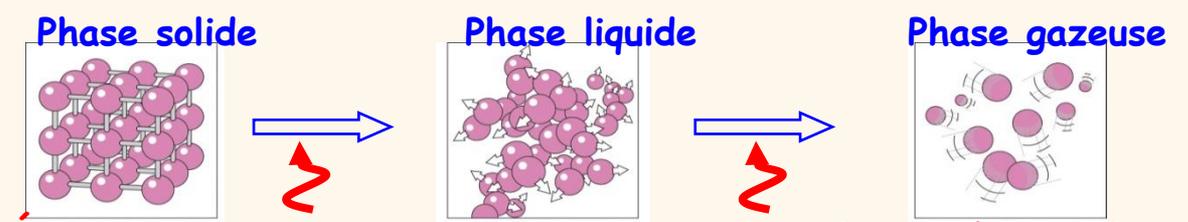


Spin du nucléus

$U$  augmente avec la température

### ii) 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**

### iii) Énergie chimique

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

### iv) Énergie nucléaire

Énergie associée aux forces de liaison dans le noyau de l'atome.

## c) Notes:

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

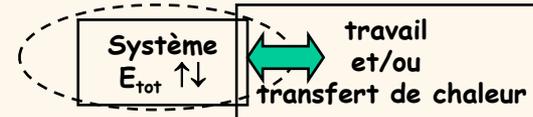
$$E_{tot} = E_c + E_p + U$$

- Unité de l'énergie: [Joule] = [N\*m] (même que pour travail)

- 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' car toute les molécules vont dans la même direction (facile à y extraire du travail, donc haute qualité). D'autre part, l'énergie cinétique microscopique (sensible) est 'désorganisée' (multidirectionnelle) (difficile à y extraire du travail, donc basse qualité). (Ce concept sera vu dans la seconde moitié du cours).

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



## 2) Transfert de chaleur

### a) Définition

- Mécanisme de transfert d'énergie due à une différence de température. Ce transfert est dénoté par  $Q$ , dont l'unité en SI est le [Joule] (même unité que l'énergie);
- Elle est transmise à travers les limites d'un système à température  $T_1$  vers un autre système de température  $T_2$  où  $T_1 > T_2$ ;
- positive si ajoutée à un system (ex: Chaudière);
- négative si dissipée par un system (ex: Condenseur);
- La chaleur dépend du chemin suivi

Air ambiant  
 $25^{\circ}\text{C}$

Aucune  
transmission  
de chaleur

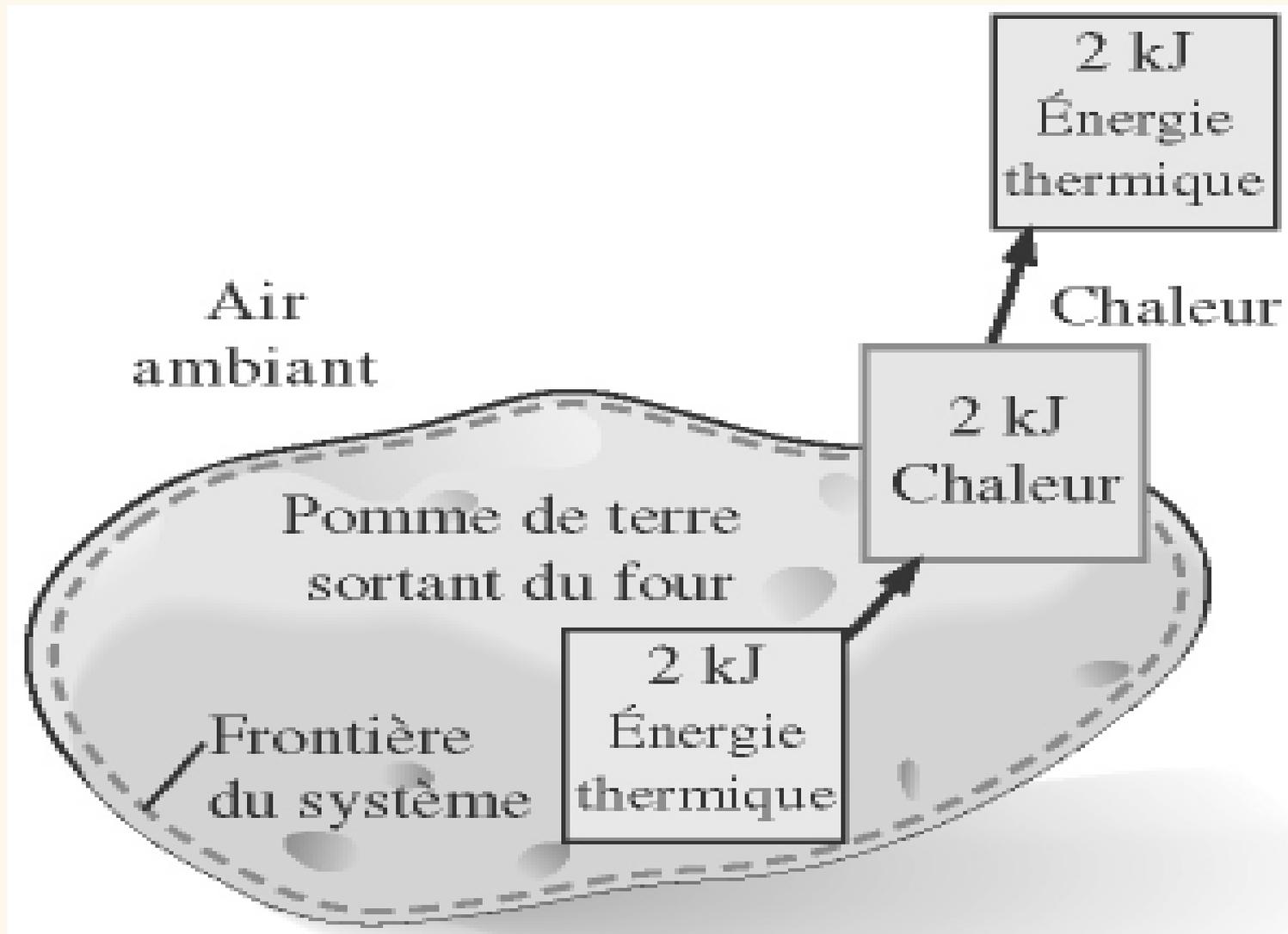


8 J/s Chaleur



16 J/s Chaleur





## b) Mécanismes de transfert de chaleur

La chaleur est transmise de trois façons: par conduction et/ou par convection et/ou par rayonnement.

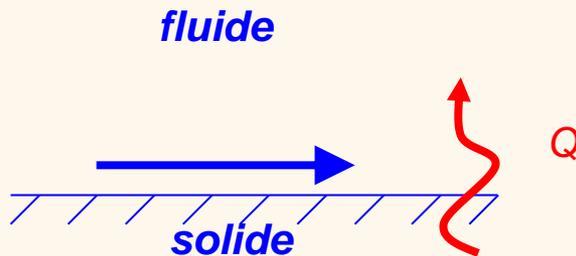
### *i) Conduction*

- Phénomène de transmission de chaleur par vibration atomique et/ou déplacement d'électrons.
- Phénomène pouvant se manifester dans les solides, les liquides et les gaz.

## ii) Convection

-Phénomène de transmission de chaleur engendré par le mouvement d'un fluide (liquide ou gaz).

- Convection forcée, naturelle ou mixte



(situation de conduction combinée  
au mouvement du fluide)

### *iii) Rayonnement*

- Phénomène de transmission de chaleur par ondes électromagnétiques.
- Phénomène pouvant se manifester dans les solides transparents aux ondes électromagnétiques, les liquides, les gaz et même dans le vide.

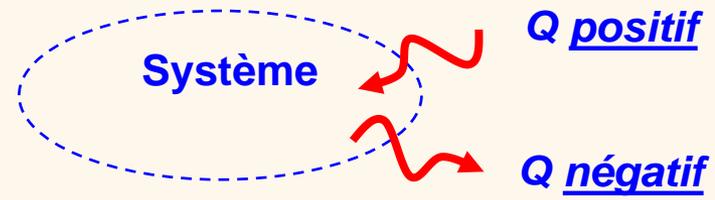
**exemple:** chaleur ressentie par la peau sous l'effet de rayons solaires ou près d'un feu.

### c) Notes:

- 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
- Taux de transfert de chaleur: [Joule/sec] ou [Watt]

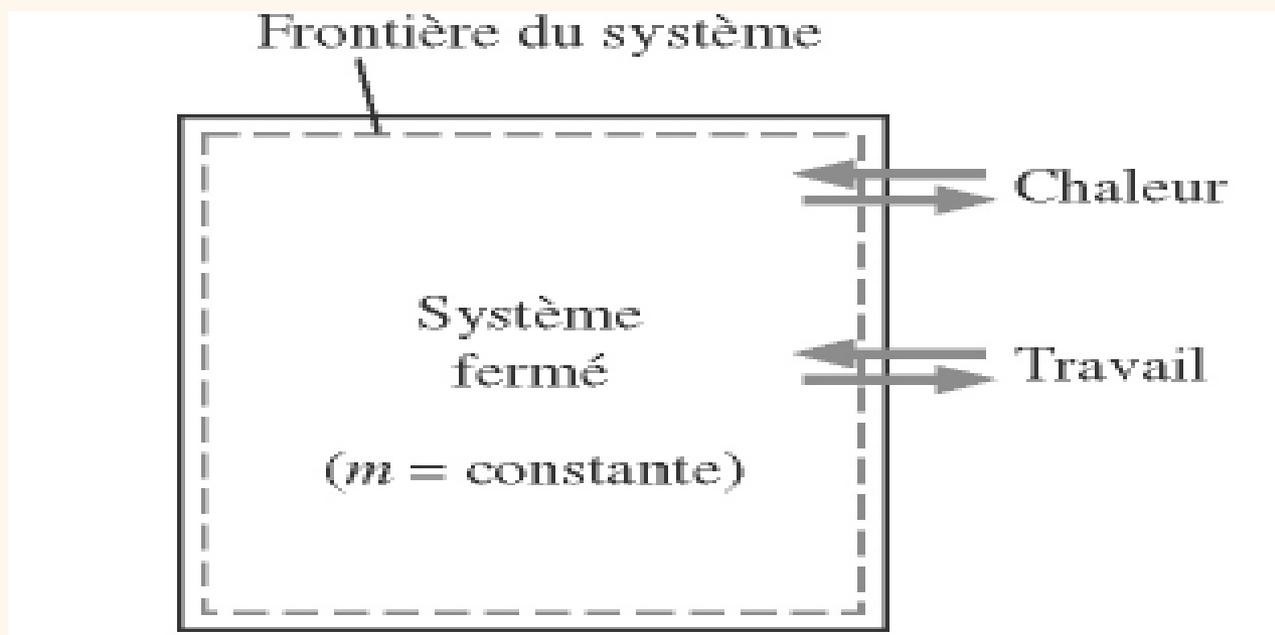
$$\dot{Q} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}$$

- Convention de signe:



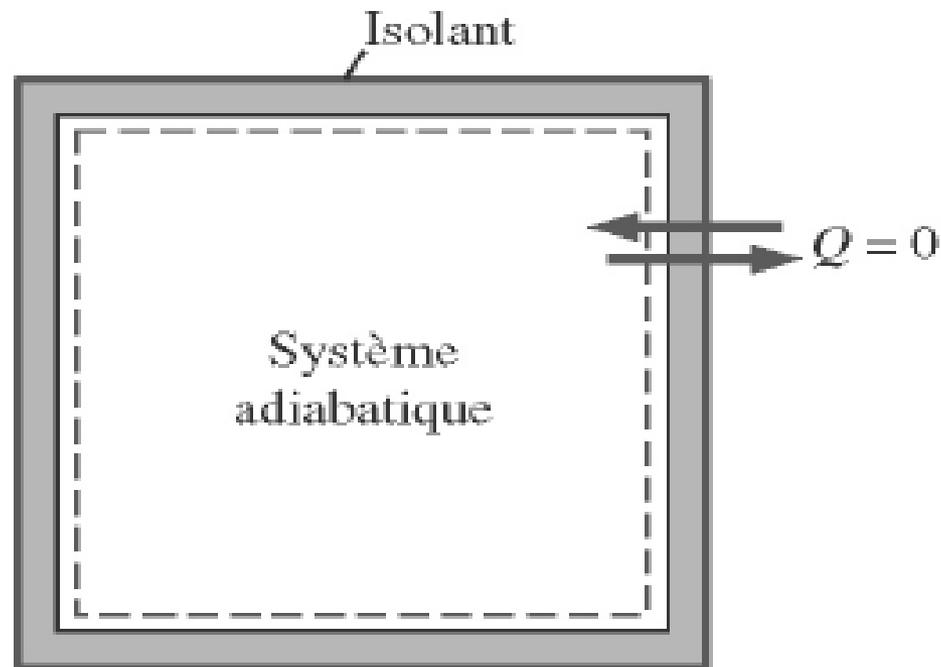
- Lorsqu'il n'y a pas de transfert de chaleur, on parle d'évolution ou de procédé adiabatique

c) Notes:



L'énergie peut traverser les frontières d'un système fermé sous forme de chaleur ou de travail.

c) Notes:



Un système ne transmet aucune chaleur au milieu extérieur durant une évolution adiabatique.

### 3) Travail

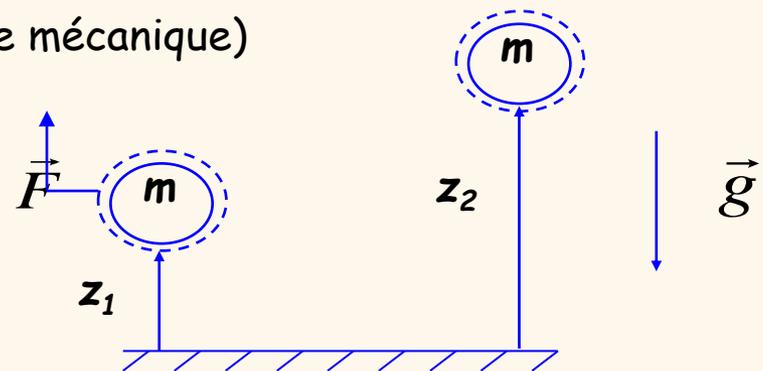
#### a) Définition

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

Démonstration que le travail est un mécanisme de changement d'énergie du système:

travail = force x déplacement (point de vue mécanique)

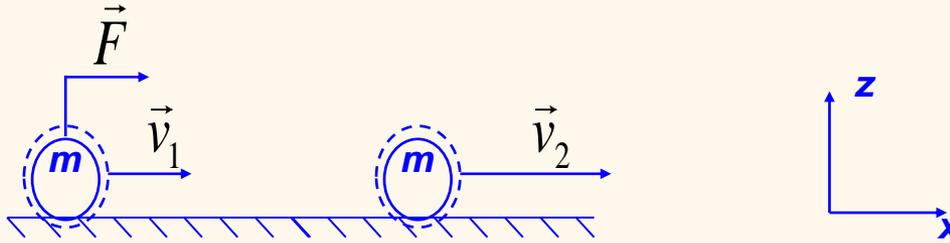
ex. 1: Élévation d'une masse



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

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

ex. 2: Accélération d'une masse

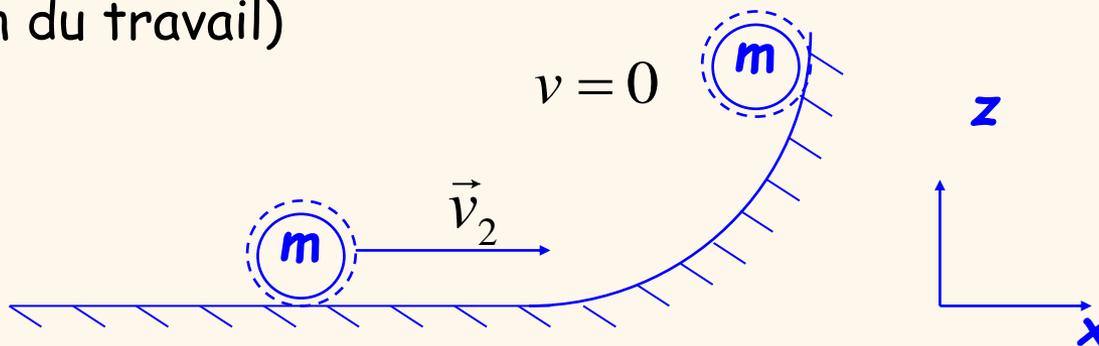


$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{1 \rightarrow 2} F dx = \int_{1 \rightarrow 2} m a dx = \int_{1 \rightarrow 2} m \frac{dv}{dt} dx = \int_{1 \rightarrow 2} m dv \frac{dx}{dt}$$

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

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

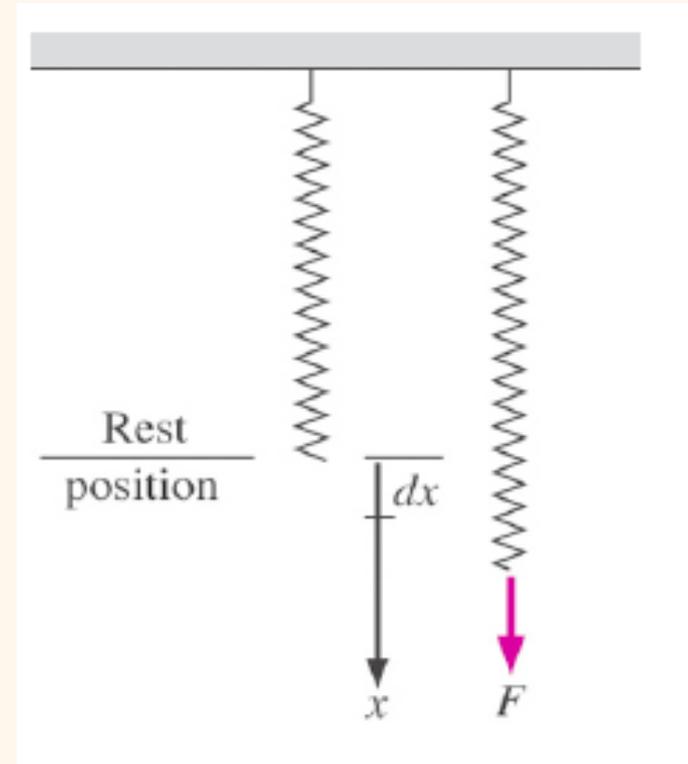
Notons que l'on peut convertir ce travail pour soulever une masse (définition du travail)



### ex. 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

$$W = \int_1^2 kx dx = k \int_1^2 x dx = \frac{1}{2} k(x_2^2 - x_1^2)$$

## b) Types de travail

i) Mécanique:  $W = \text{force } (F) \times \text{déplacement } (s)$

ou

$W = \text{couple } (T=F*r) \times \text{déplacement angulaire } (\theta)$

ii) Électrique:  $W = \text{différence de voltage } (V) \times \text{nombre de charges électriques } (N)$

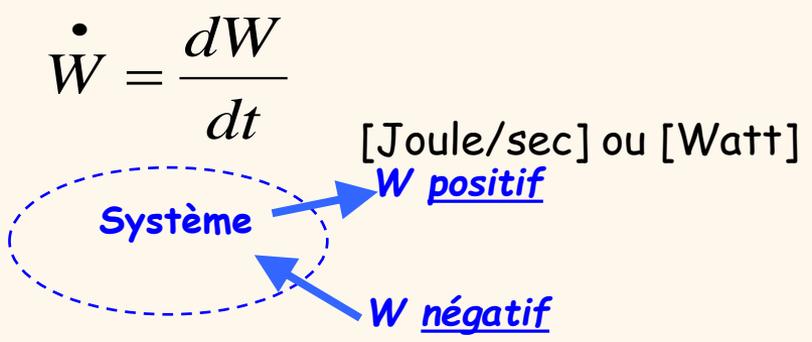
et

$$\frac{dW}{dt} = V \times I \quad (\text{où le courant } I [\text{Amp}] = \frac{dN}{dt})$$

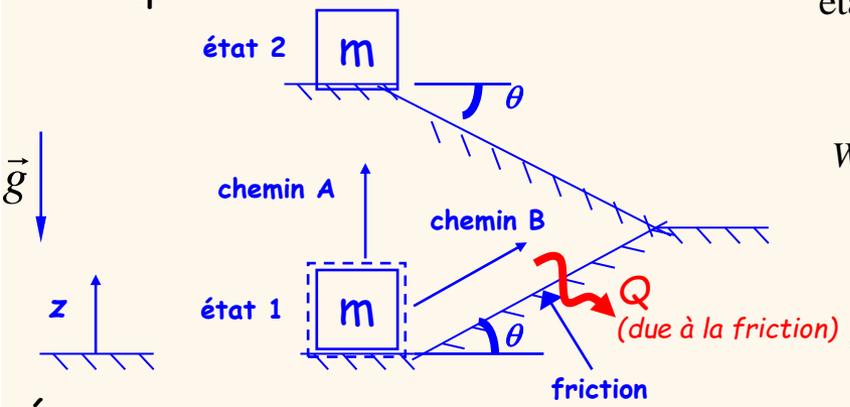
iii) Autres: magnétique (même équivalence mécanique que pour travail électrique)

### c) Notes

- Taux de travail (puissance):
- Convention de signe:



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

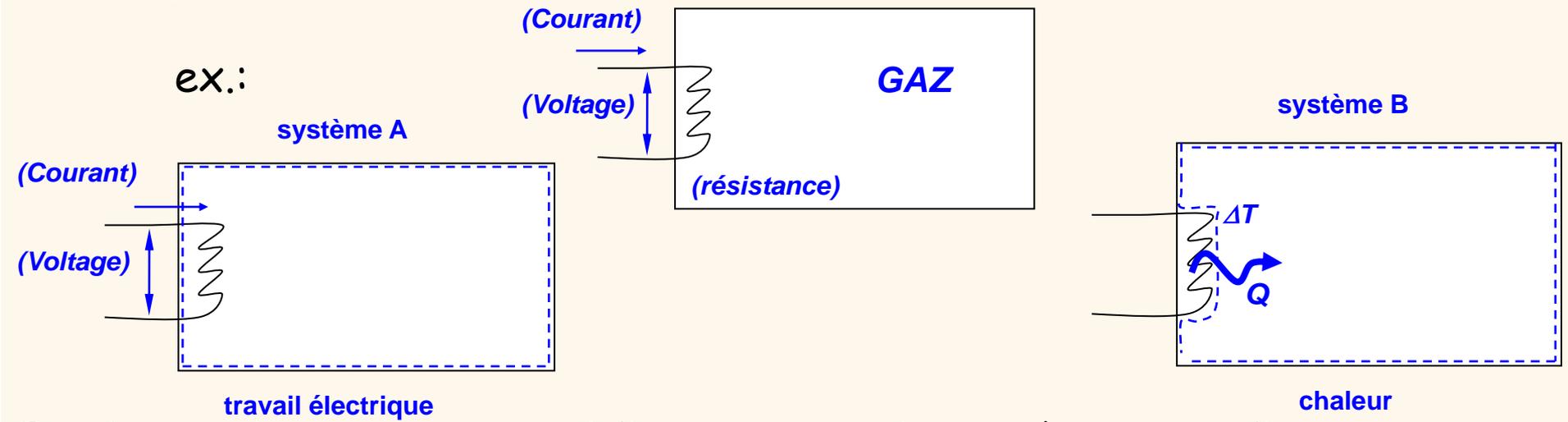
$$W_{1 \rightarrow 2} \begin{cases} W_A = \int_A \delta W = \int_{z_1}^{z_2} mg dz = mg(z_2 - z_1) \\ W_B = \int_B \delta W = \int_{z_1}^{z_2} (mg \sin \theta + F_{friction}) \frac{dz}{\sin \theta} = mg(z_2 - z_1) + W_{friction} \end{cases}$$

$$Q_{1 \rightarrow 2} \begin{cases} Q_A = 0 \\ Q_B = W_{friction} \end{cases}$$

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  $\delta W$  et  $\delta Q$ , respectivement.

### c) Notes (cont.)

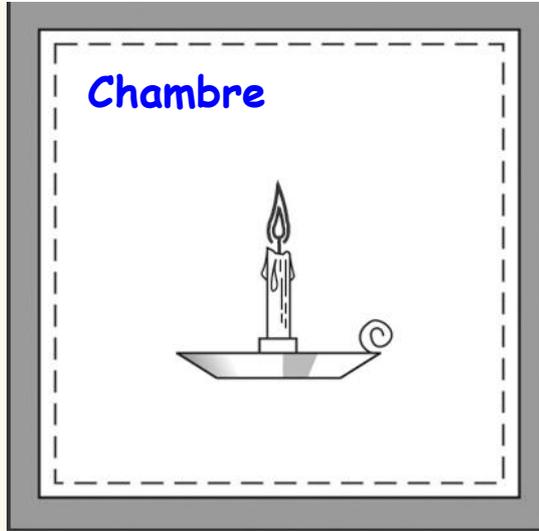
- La chaleur et le travail sont des interactions traversant la frontière du système. Il faut donc regarder à la frontière pour déterminer leur nature.
- Chaleur ou travail? La réponse peut dépendre du choix du système; regarder ce qui traverse la frontière du système choisi.



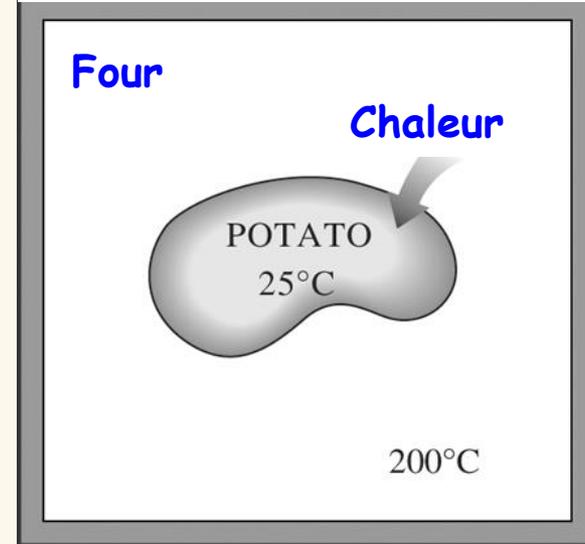
En thermodynamique, quand l'interaction du système avec l'environnement n'est pas le transfert de chaleur (c'est à dire due à une différence de température), c'est du travail.

# EXEMPLE

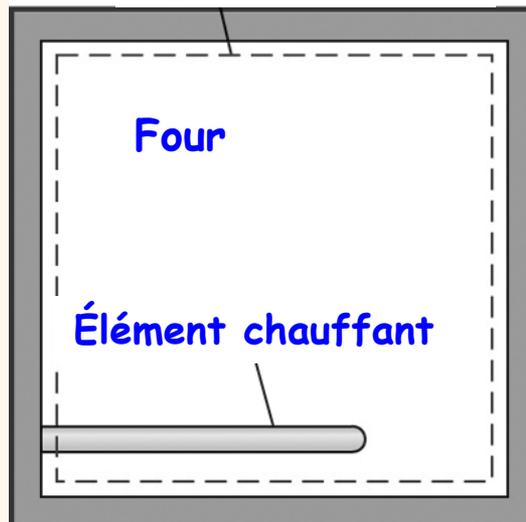
## Isolation



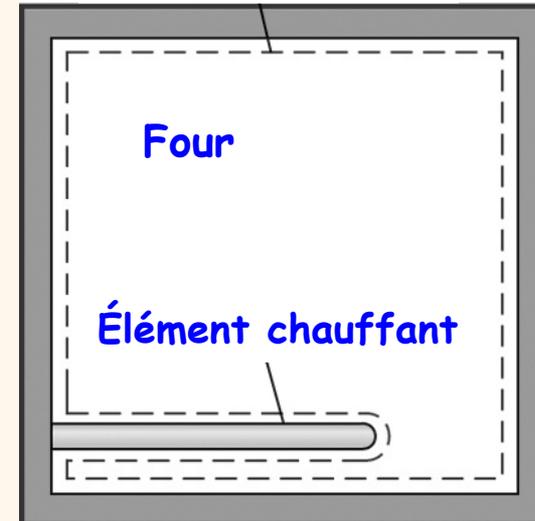
## Isolation



## Système



## Système

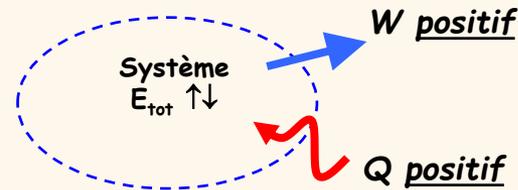


## 4) Premier principe de la thermodynamique (expression générale)

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.

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

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



Autres formes:

i) Taux:  $\dot{E}_{tot,sys} = \dot{Q} - \dot{W}$  où  $(\dot{\quad}) \equiv \frac{d(\quad)}{dt}$

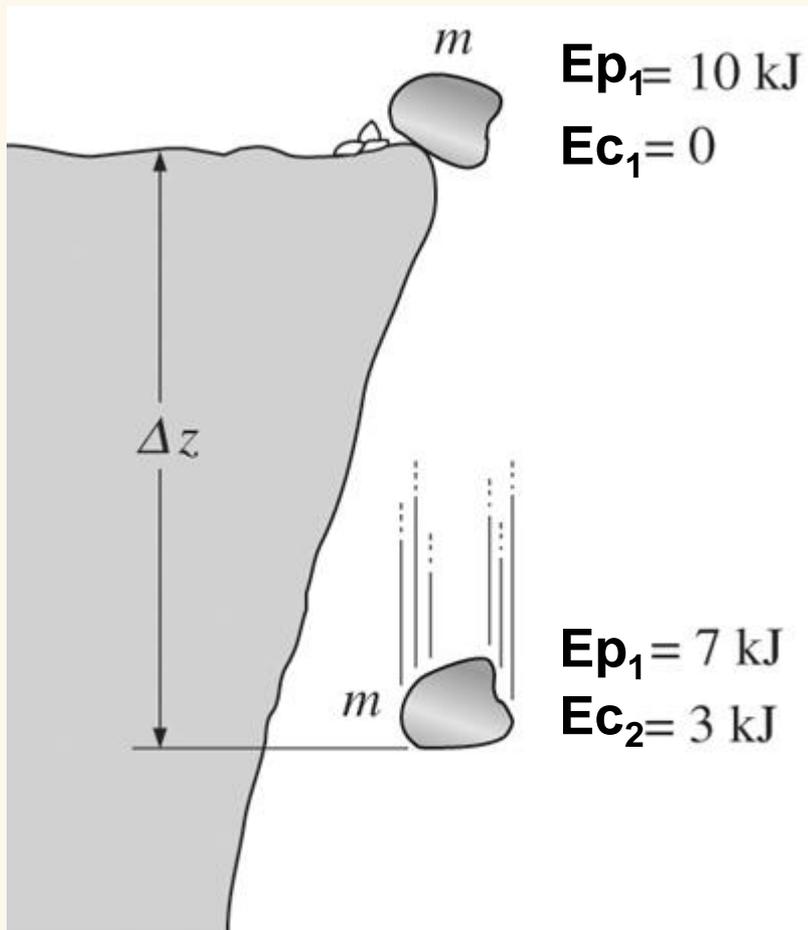
ii) Forme spécifique (par unité de masse) ( $\times 1/m$ ):  $\Delta e_{tot,sys} = q - w$

iii) Forme alternative  $\Delta E_{tot,sys} = |E_{in}| - |E_{out}|$

Notes:

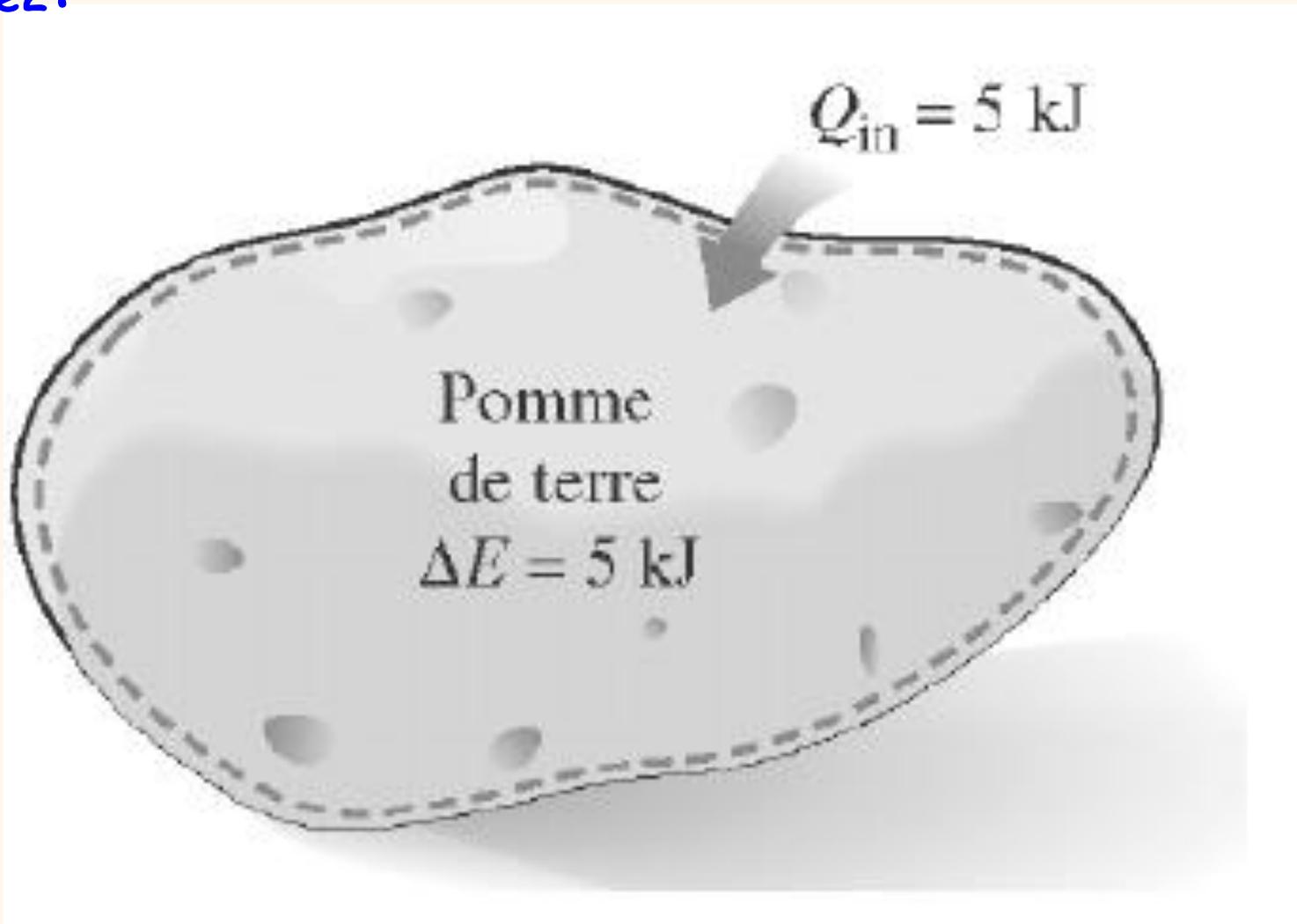
- Pour les systèmes stationnaires  $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ , donc  $\Delta E_{tot,sys} = \Delta U$
- Pour les cycles:  $\Delta E_{tot,sys} = 0$ , donc  $W = Q$

## Exemple 1:

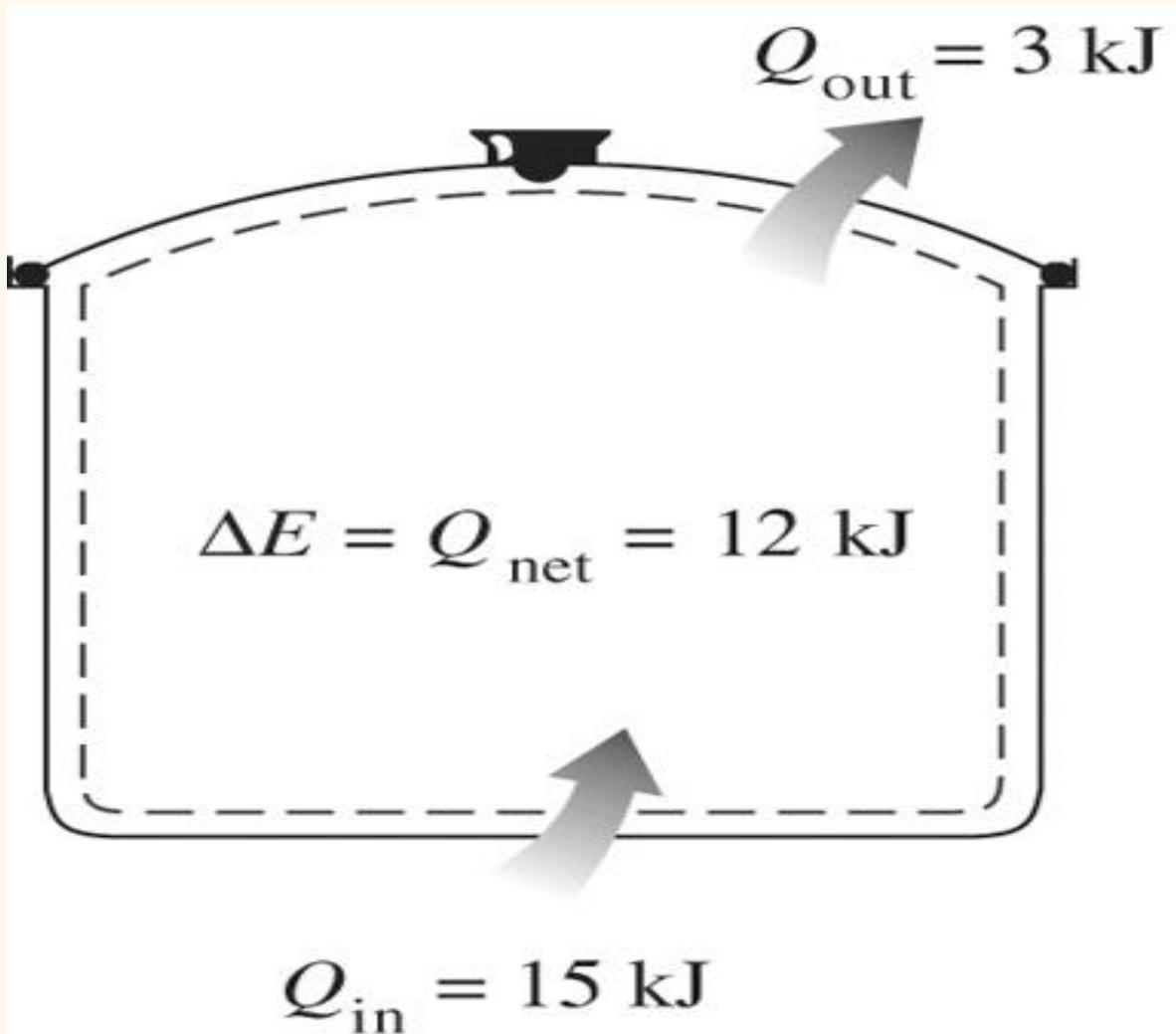


L'énergie n'est ni produite ni détruite. Elle est transformée d'une forme à une autre

## Exemple2:

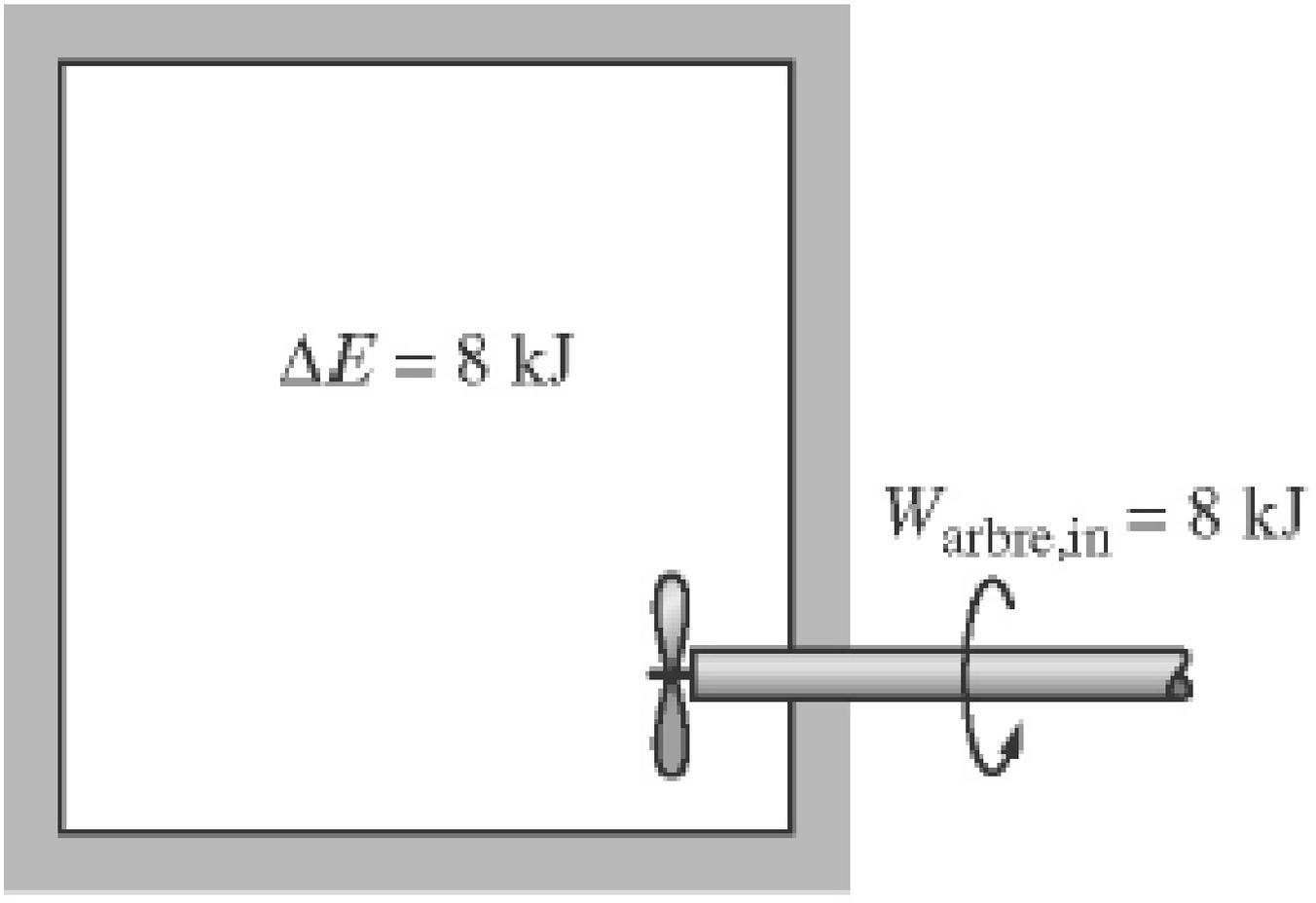


### Exemple 3:

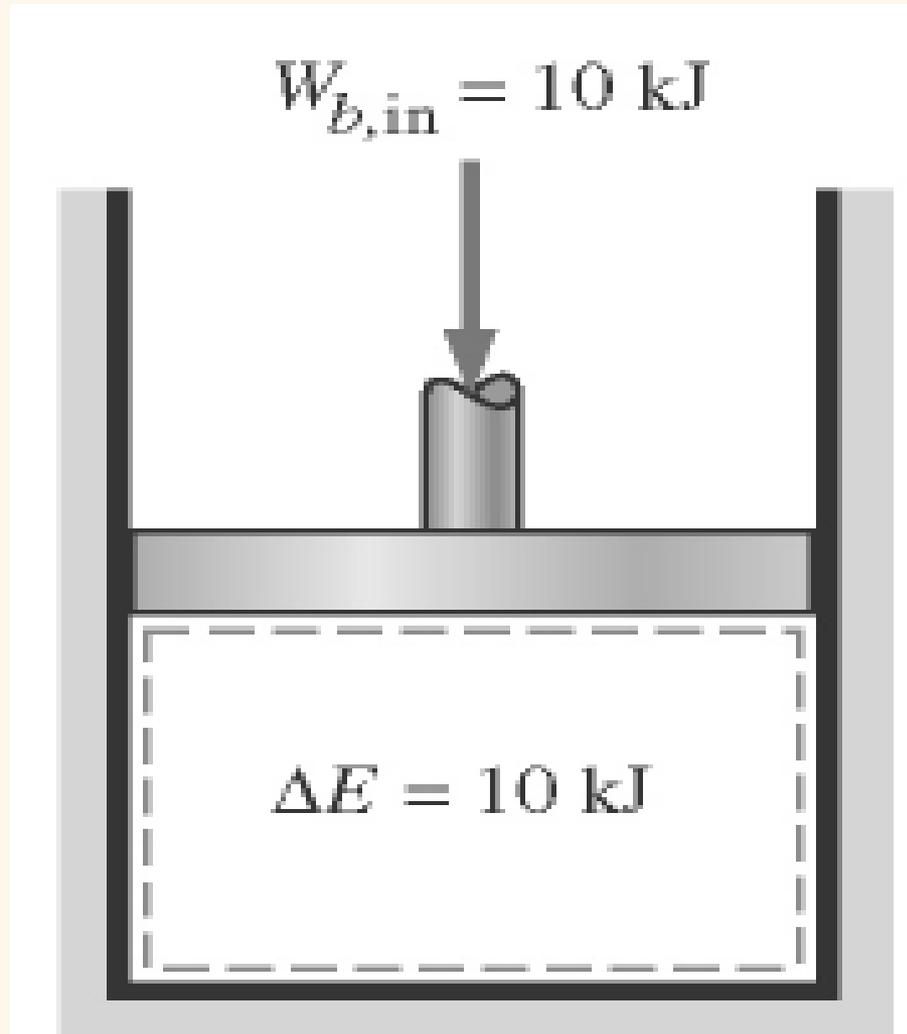


Exemple4:

(Système adiabatique)



## Exemple5:



## Résumé

(Variation de l'énergie total du système) = (Énergie total entrante) - (Énergie totale sortante)

soit:

$$\Delta E_{tot,sys} = |E_{in}| - |E_{out}|$$

$$\Delta E_{tot,sys} = E_{final} - E_{initial} = E_2 - E_1$$

*soit*

$$\Delta E_{tot,sys} = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p$$

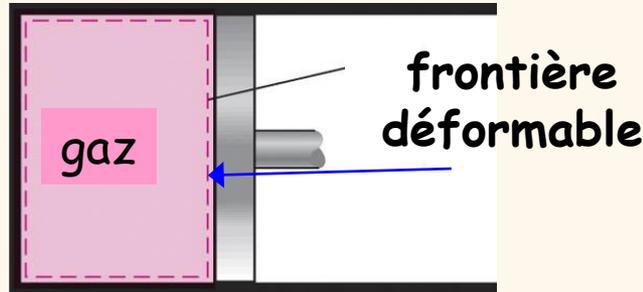
où

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2)$$

$$\Delta E_p = mg(z_2 - z_1)$$

## 5) Bilan d'énergie pour un système fermé



Premier principe (différents formats):

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

$$\Delta e_{tot,sys} = q - w$$

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

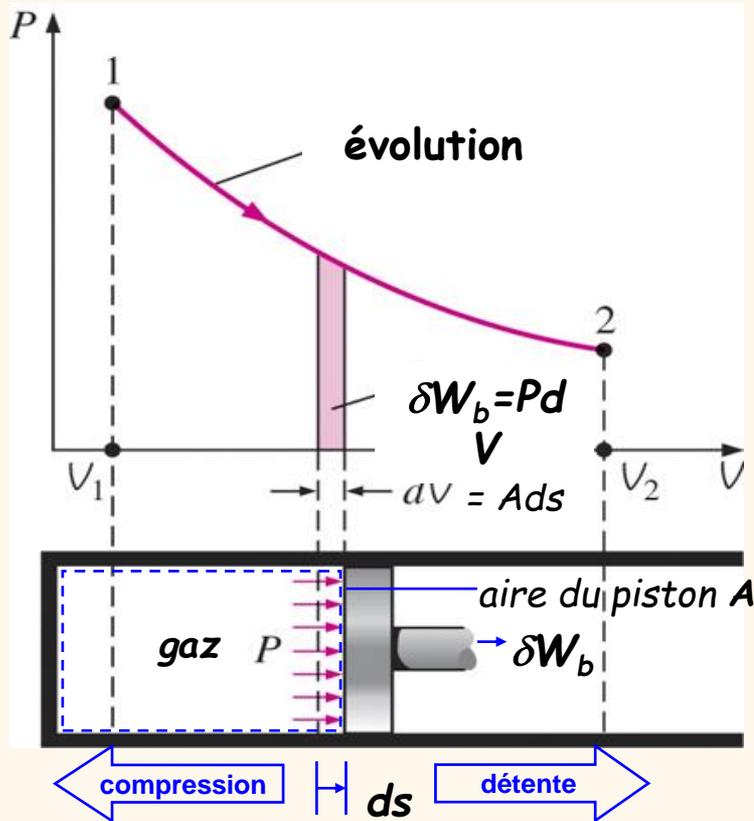
$$W = \underbrace{W_b}_{\downarrow} + \underbrace{W_{autres}}_{\rightarrow}$$

autres travaux (mécaniques, électriques, magnétiques, ...)

Travail:

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

## Travail de frontières effectué lors d'une détente/compression



### 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

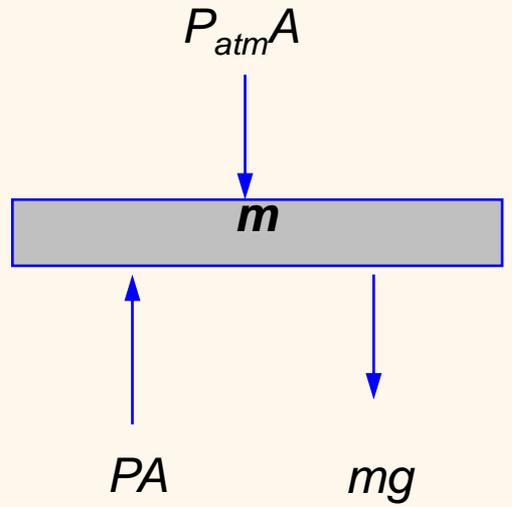
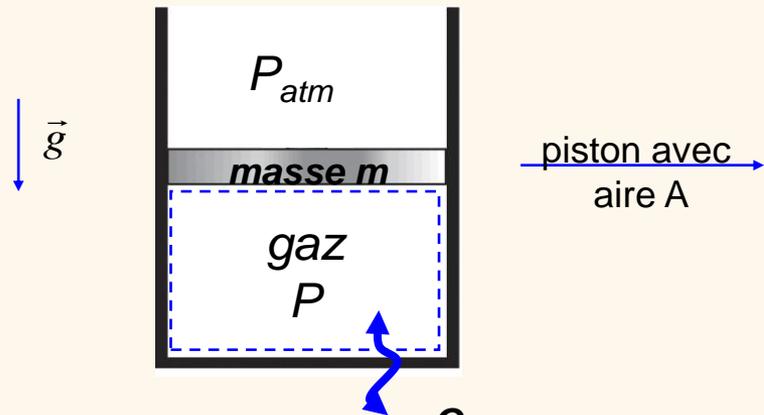
$$\delta W_b = \text{force} \cdot \text{déplacement} = F \cdot ds = PA \cdot ds = PdV$$

$$W_b = \int_{\text{état1}}^{\text{état2}} \delta W_b = \int_{V_1}^{V_2} PdV = \text{aire sous la courbe P - V entre états 1 et 2}$$

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

associé:

i) Évolution isobarique (pression constante)

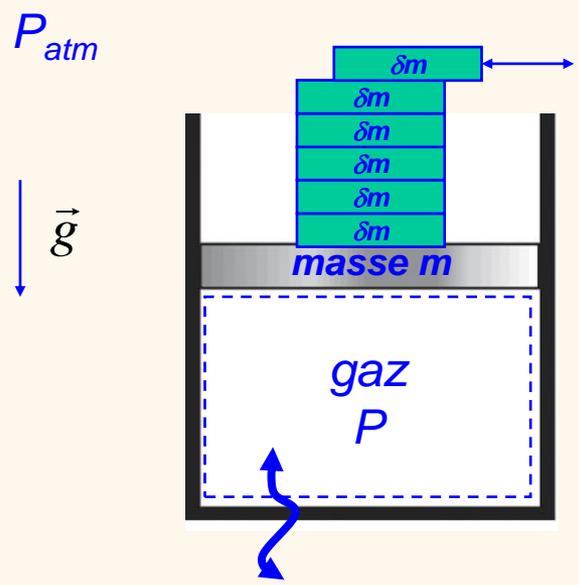


$$\sum F_z = PA - P_{atm}A - mg = ma = 0 \quad (\text{quasi-statique : } a \cong 0)$$

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

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

## ii) Évolution isothermique (température constante) pour un gaz parfait



pour un gaz parfait (Chimie 101):

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

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

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

**Q** (chaleur ajoutée/retirée pour garder la température constante au fur et à mesure q'on réduit/augmente la pression en enlevant/ajoutant des petites masses  $\delta m$ )

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

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

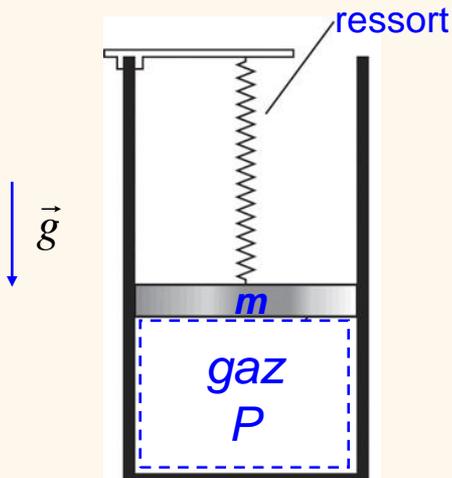
### iii) Évolution polytropic ( $PV^n = \text{constant}$ , $n \neq 1$ )

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

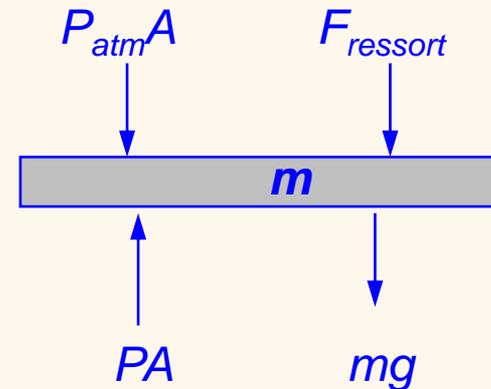
$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} PdV = C \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n} = C \left[ \frac{V^{-n+1}}{-n+1} \right]_{V_1}^{V_2} = \frac{1}{1-n} (CV_2^{1-n} - CV_1^{1-n}) = \frac{1}{1-n} (P_2V_2^n V_2^{1-n} - P_1V_1^n V_1^{1-n})$$

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

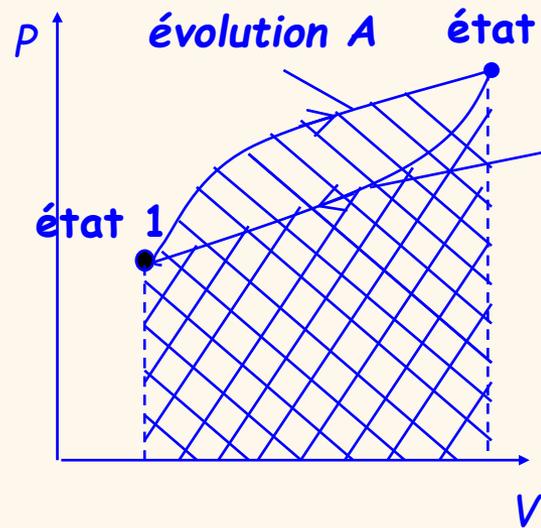
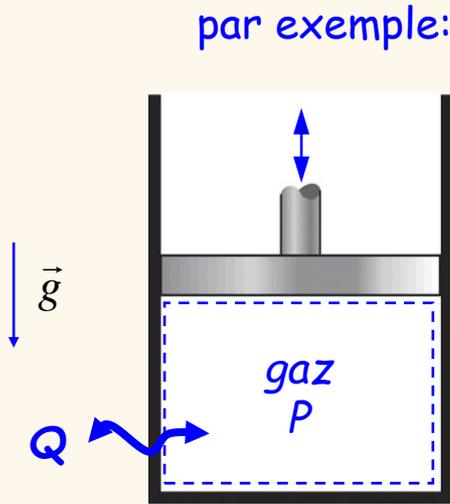
### iv) Expansion/compression contre un ressort

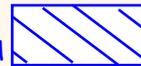


Pour trouver  $P=f(V)$ :



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



aire  $A_A$  

aire  $A_B$  

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

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

$$W_{cycle} = A_A - A_B$$

**Exemple 3 (en classe):** expansion contre un ressort

## Exercice

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  $z_2$

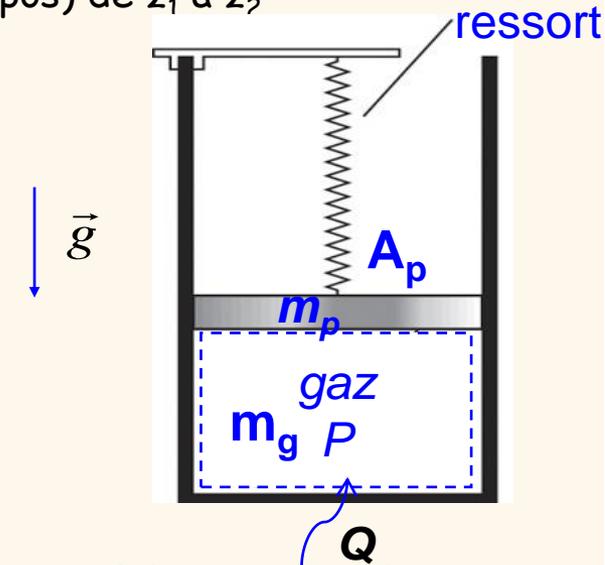
On demande de calculer:

- 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:

$$k=10\text{KN/m}, P_a=100\text{kPa}, A_p=7.8 \cdot 10^{-3}\text{m}^2, m_p=10\text{kg}, m_g=5 \cdot 10^{-4}\text{kg}$$

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



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

**Ps:** pour tester votre compréhension, faites le problème en considérant:

- système: gaz, b) système: gaz+piston, c) système: gaz+piston+ressort

Réponse a)  $P_1=112.6\text{kPa}$ ,  $P_2=176.10\text{kPa}$

-Système : gaz:	b) $W=56.4\text{J}=0.056\text{kJ}$ ,	c) $Q=117.9\text{J}=0.1179\text{kJ}$
-Système : gaz+piston:	b) $W=51.49\text{J}=0.05149\text{kJ}$ ,	c) $Q=117.9\text{J}=0.1179\text{kJ}$
-Système : gaz+piston+ressort:	b) $W=39\text{J}=0.039\text{kJ}$ ,	c) $Q=117.9\text{J}=0.1179\text{kJ}$

## LECTURE SECTION DU LIVRE

Sections 2.1 à 2.6, 4.1, 4.2 du livre, «THERMODYNAMIQUE, une approche pragmatique», Y.A. Çengel, M.A. Boles et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2ed 2014.