

MEC1210 THERMODYNAMIQUE

ENSEIGNANT: Slimane Benneceur
COURRIEL: slimane.benneceur@polymtl.ca

D'après les notes de cours des Prs. Huu Duc Vo et Ramdane Younsi

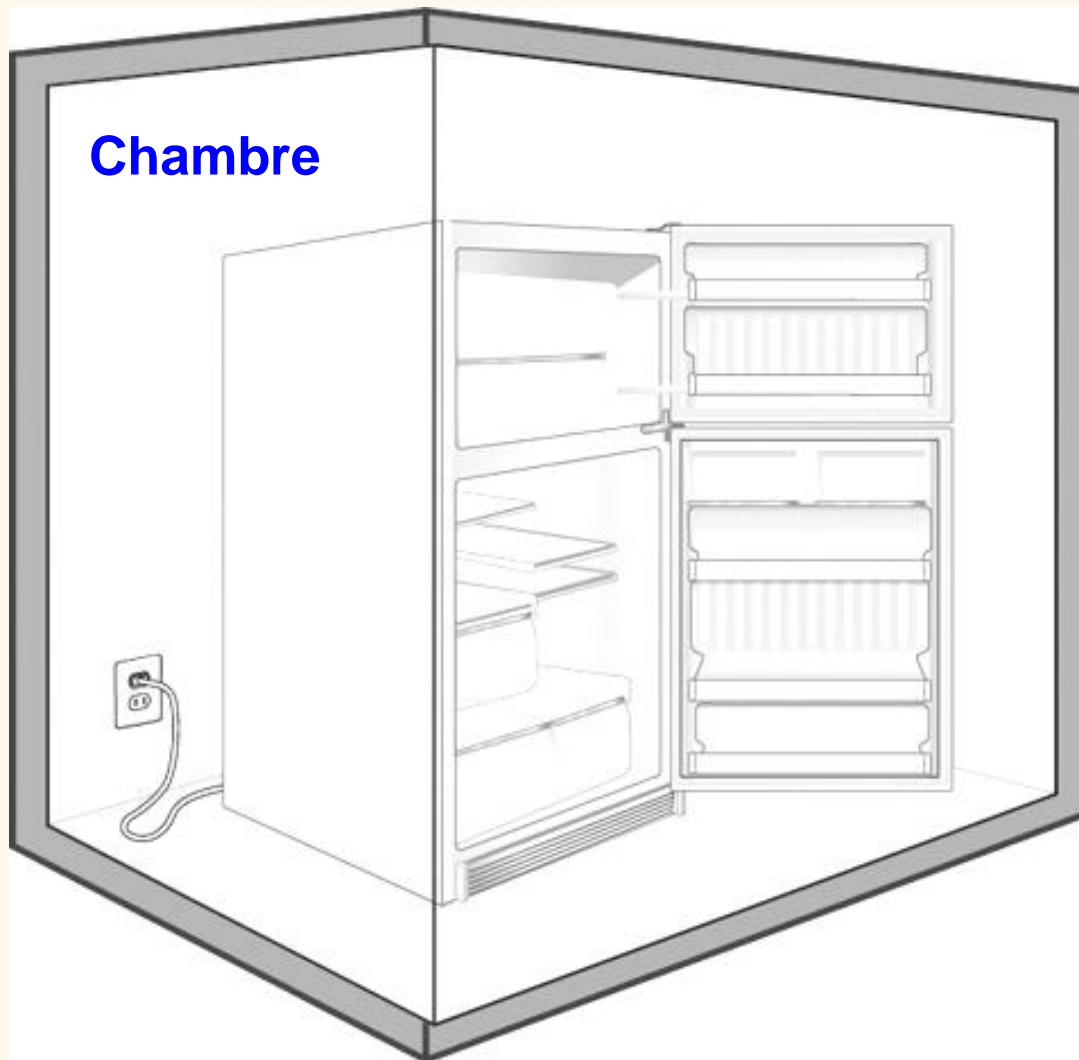
Chapitre 3:

1er principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

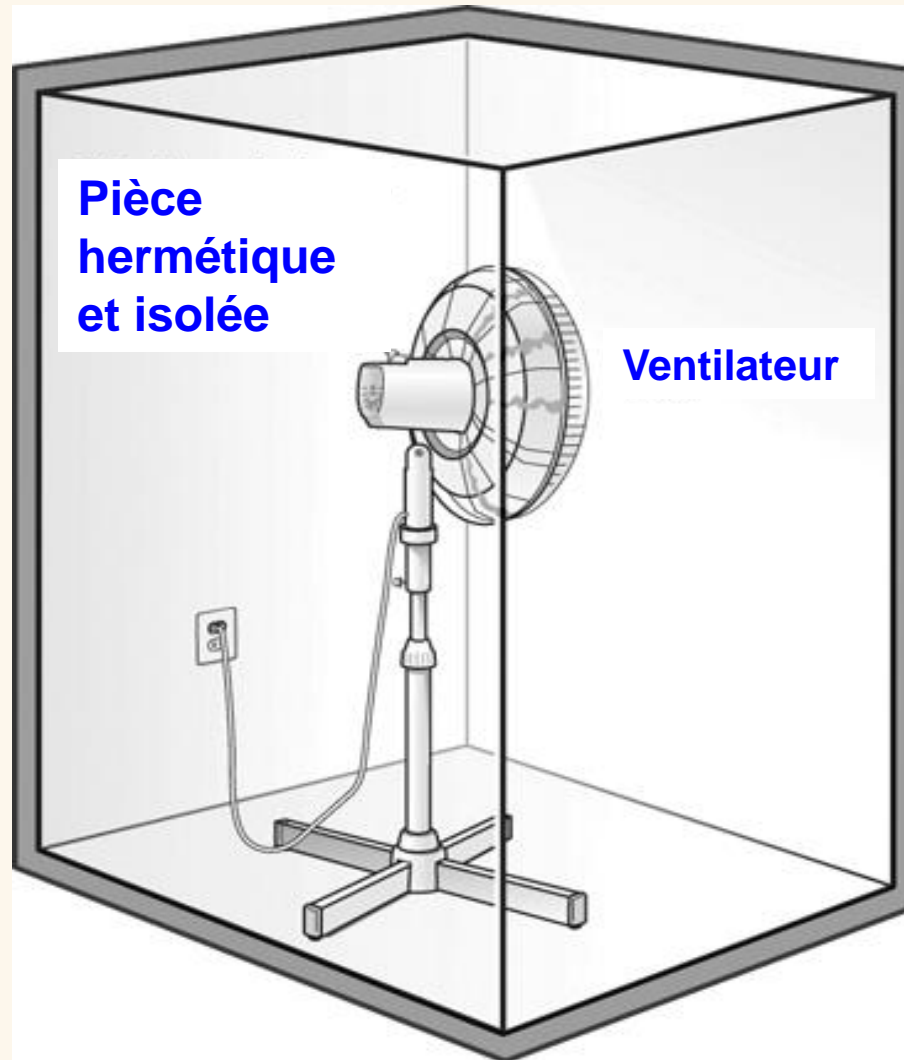
OBJECTIFS

- ❑ 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^{ère} loi de la thermodynamique.
- ❑ Étudier le travail de frontière déformable
- ❑ Maîtriser l'analyse des bilans dans les systèmes fermés

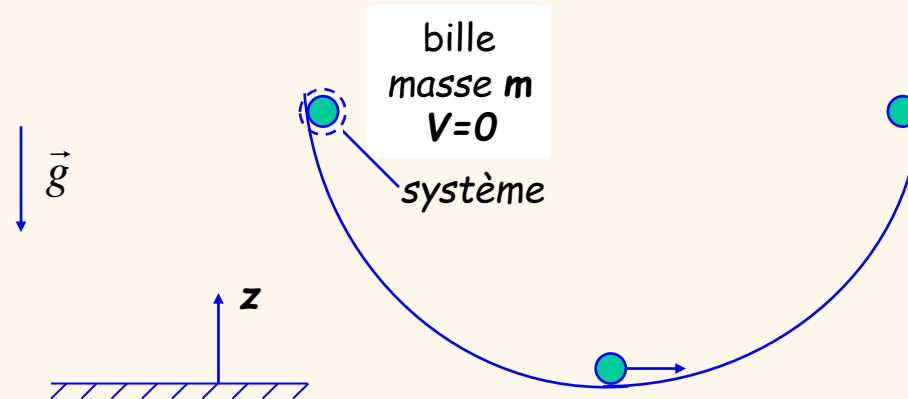
La pièce se refroidit ou se réchauffe?



La pièce se refroidit ou se réchauffe?



Considérons l'exemple:



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

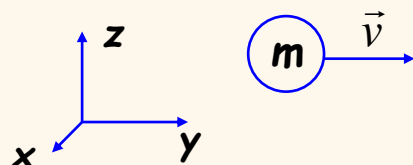
Considérez maintenant qu'il y ait traînée, friction (pertes) et changement de température de la bille. Il faudrait donc ajouter des termes dans cette équation, notamment:

- 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



\vec{g} (ou champ électrique, magnétique,...)

i) Énergie cinétique

Énergie due au mouvement dans le système de référence

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad \mathbf{J}$$

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

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.)

$$E_p = mgz \quad \mathbf{J}$$

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

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

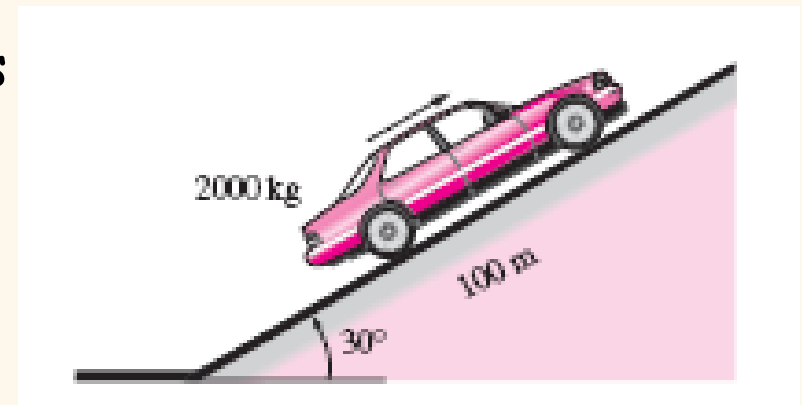
Exemple 3

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

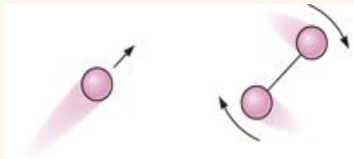


b) Énergie microscopique (interne)

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

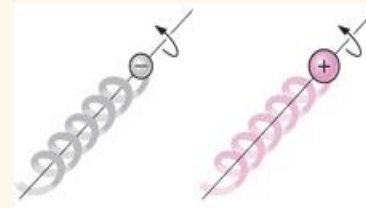
Énergie cinétique due aux mouvements des molécules/atomes/particules subatomiques (translation, rotation, vibration)



Translation, rotation et vibration
moléculaire



Translation et spin
de l'électron

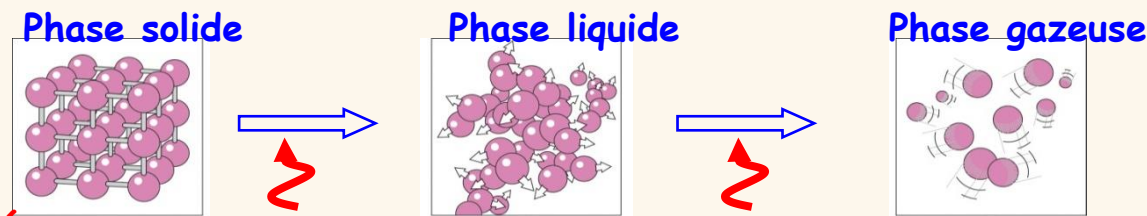


Spin du nucléus

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

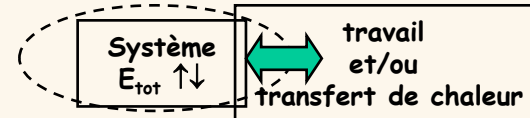
Énergie associée aux forces de liaison dans le noyau de l'atome.

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 concepts: **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°C

Aucune
transmission
de chaleur

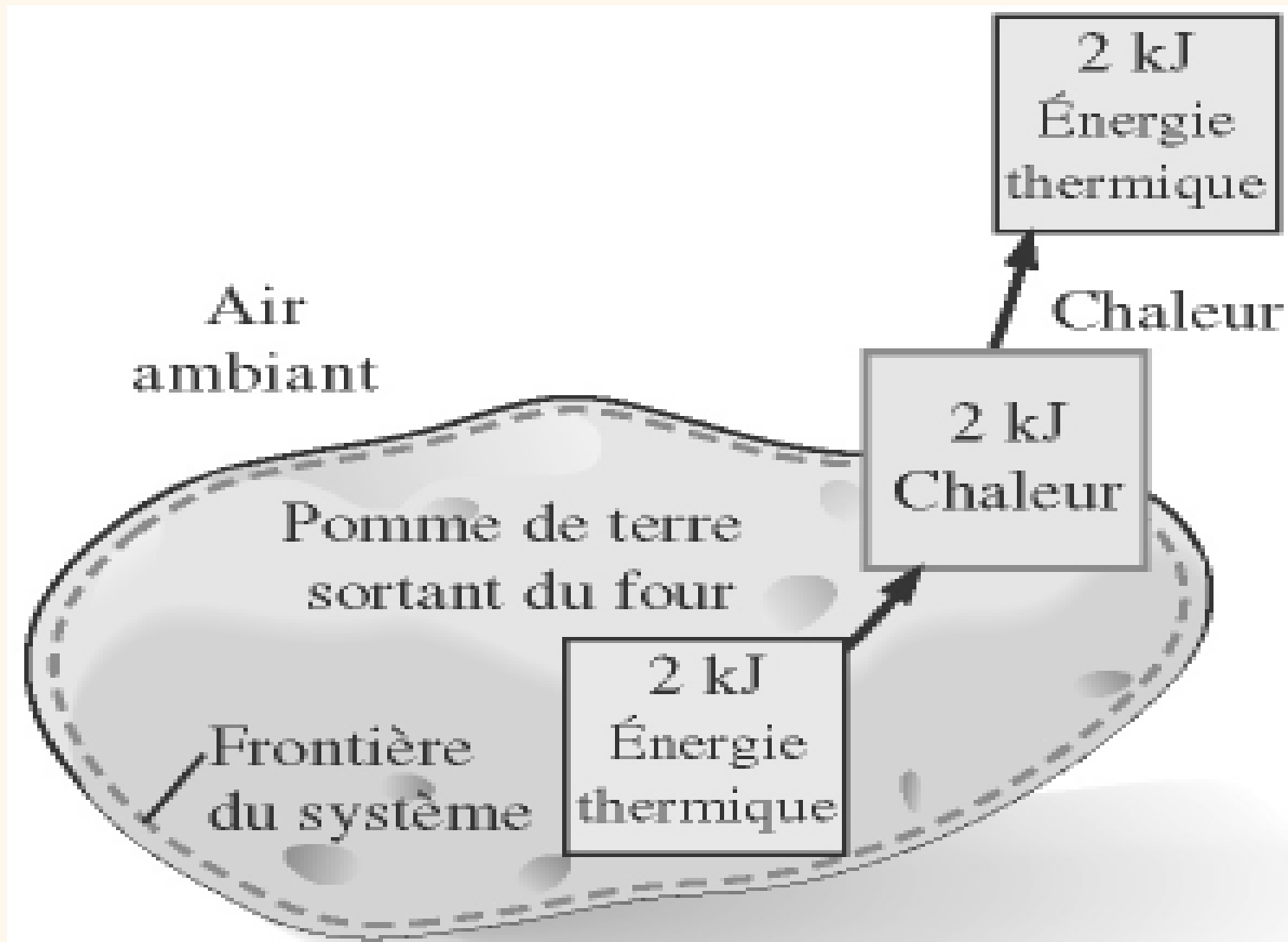


8 J/s Chaleur



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.

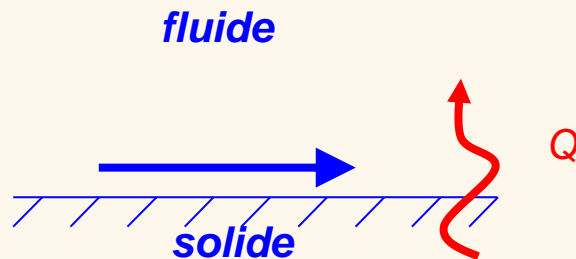
i) Conduction

- 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

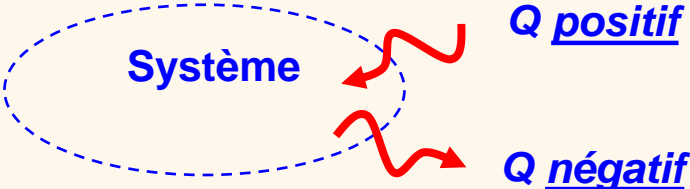
- Phénomène de transmission de chaleur par ondes électromagnétiques.
- Phénomène pouvant se manifester dans les solides transparents aux ondes électromagnétiques, les liquides, les gaz et même dans le vide.

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

c) Notes:

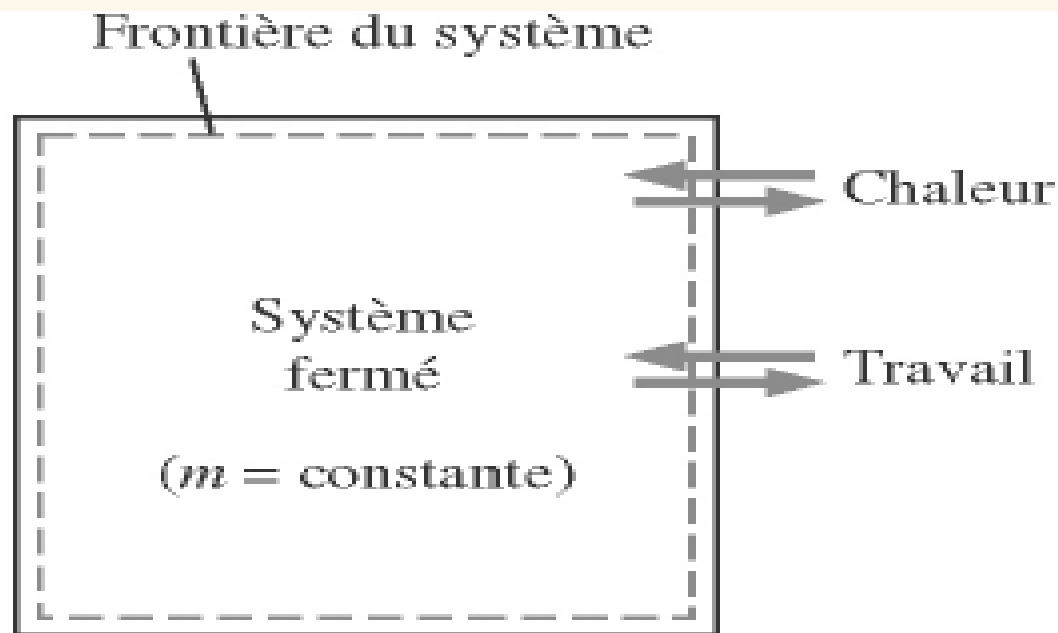
- En thermodynamique, quand l'interaction du système avec l'environnement n'est pas le transfert de chaleur (c'est-à-dire due à une différence de température), c'est du travail
- Taux de transfert de chaleur: [Joule/sec] ou [Watt]

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

- Convention de signe: 

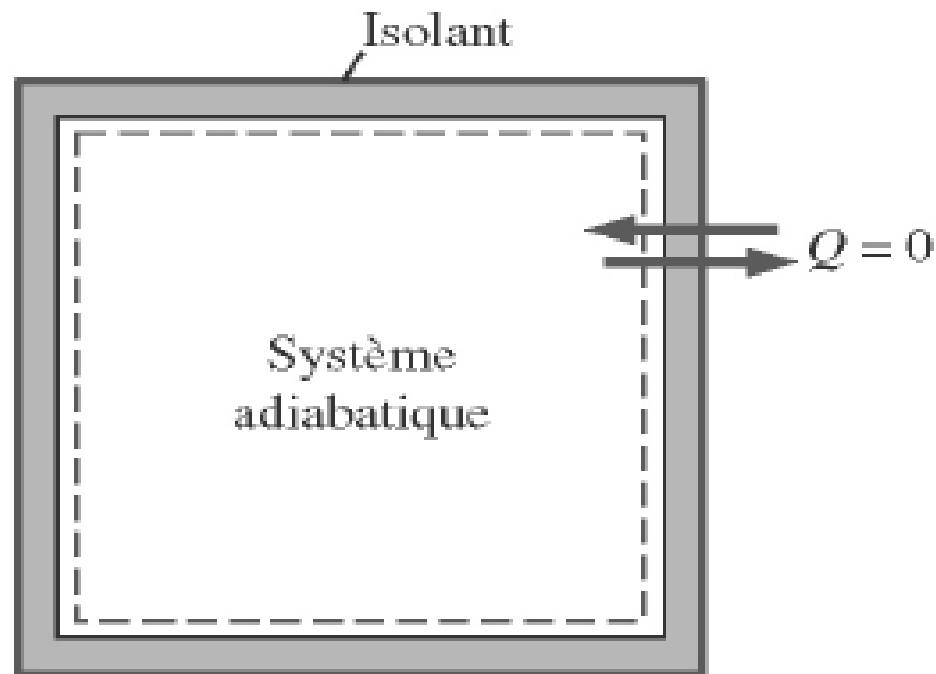
- Lorsqu'il n'y a pas de transfert de chaleur, on parle d'évolution ou de procédé adiabatique

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

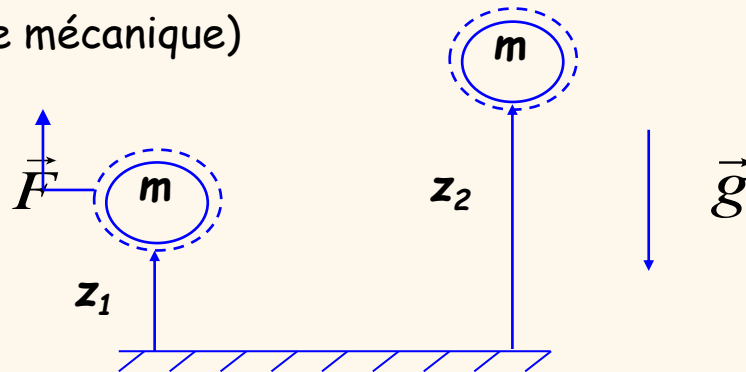
a) Définition

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)

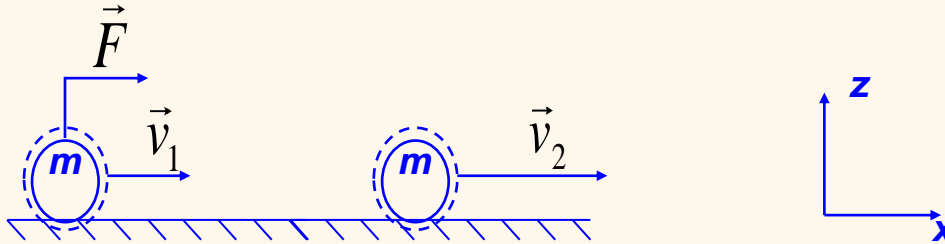
ex. 1: Élévation d'une masse



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

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

ex. 2: Accélération d'une masse

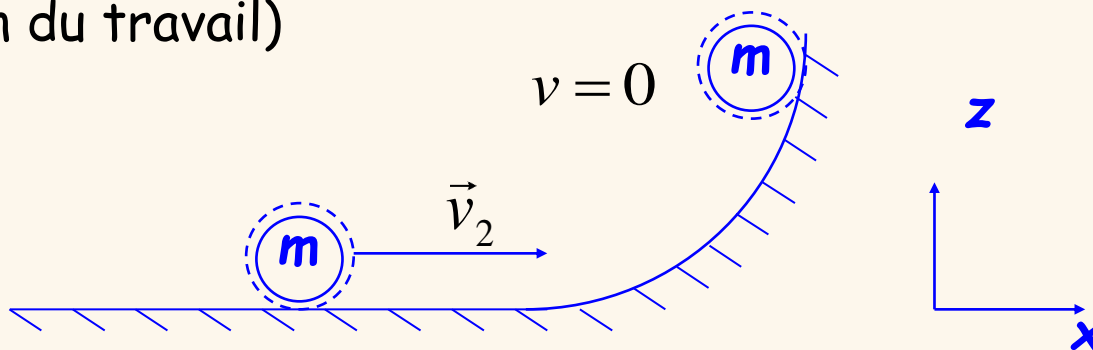


$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{1 \rightarrow 2} F dx = \int_{1 \rightarrow 2} m a dx = \int_{1 \rightarrow 2} m \frac{dv}{dt} dx = \int_{1 \rightarrow 2} m dv \frac{dx}{dt}$$

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

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

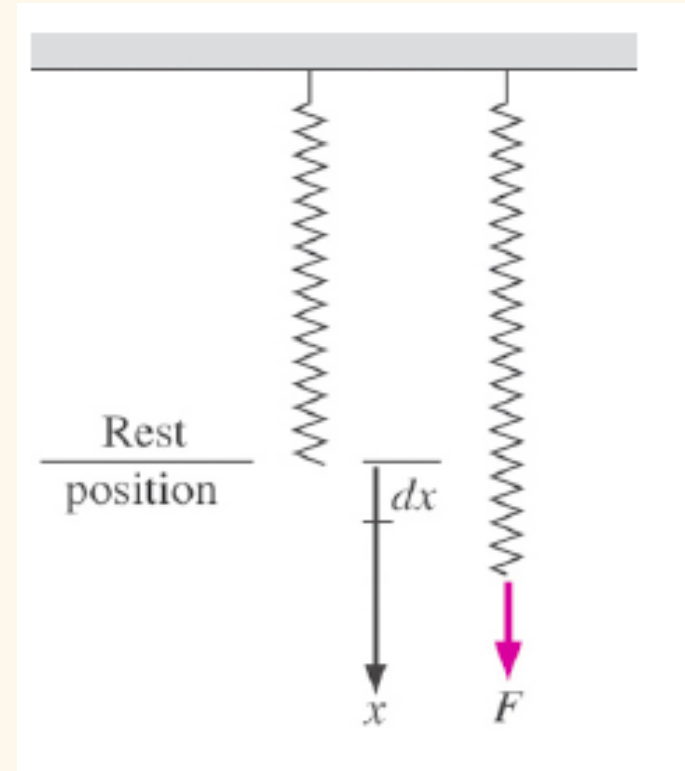
Notons que l'on peut convertir ce travail pour soulever une masse (définition du travail)



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 = force (F) x déplacement (s)

ou

W = couple ($T=F*r$) x déplacement angulaire (θ)

ii) Électrique: W = différence de voltage (V) x 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)

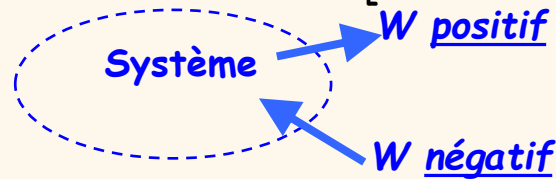
c) Notes

• Taux de travail (puissance):

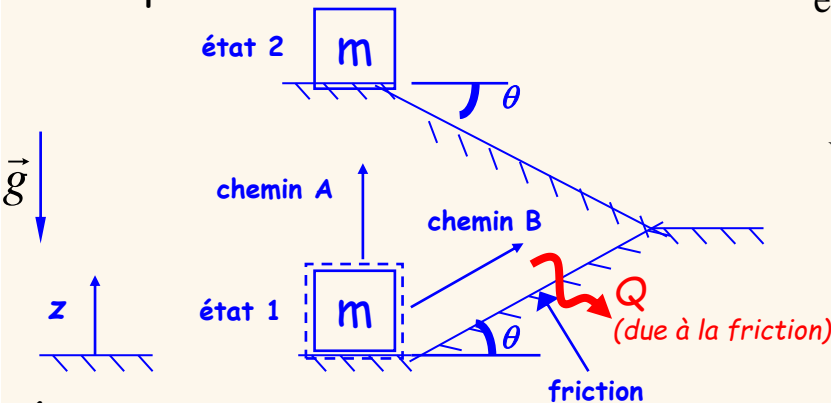
$$\dot{W} = \frac{dW}{dt}$$

[Joule/sec] ou [Watt]

• 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:



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

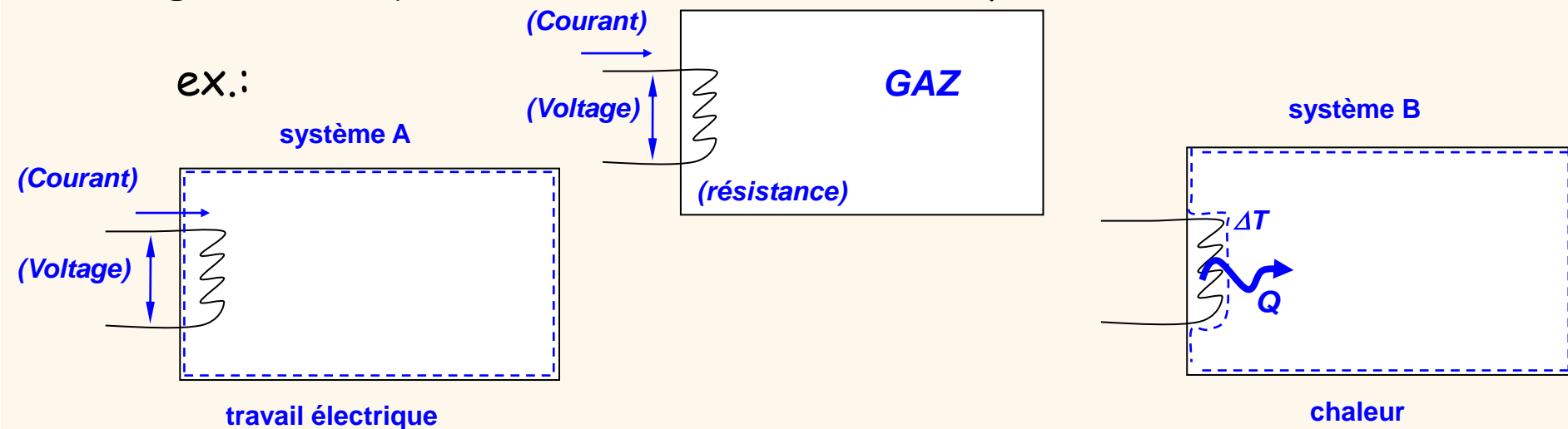
$$W_{1 \rightarrow 2} \begin{cases} W_A = \int_A \delta W = \int_{z_1}^{z_2} mg dz = mg(z_2 - z_1) \\ W_B = \int_B \delta W = \int_{z_1}^{z_2} (mg \sin \theta + F_{\text{friction}}) \frac{dz}{\sin \theta} = mg(z_2 - z_1) + W_{\text{friction}} \end{cases}$$

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

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.

c) Notes (cont.)

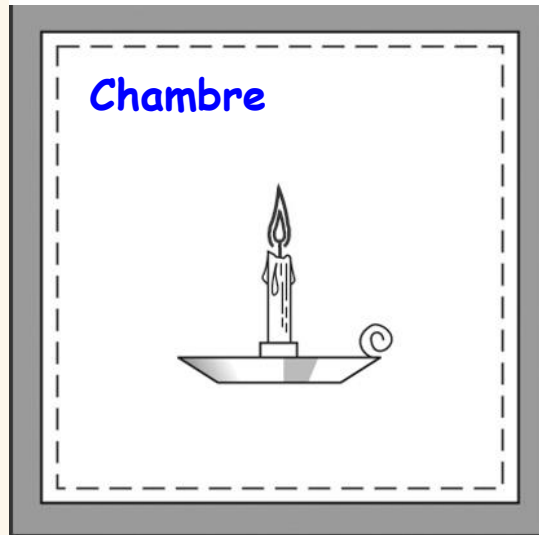
- La chaleur et le travail sont des interactions traversant la frontière du système. Il faut donc regarder à la frontière pour déterminer leur nature.
- Chaleur ou travail? La réponse peut dépendre du choix du système; regarder ce qui traverse la frontière du système choisi.



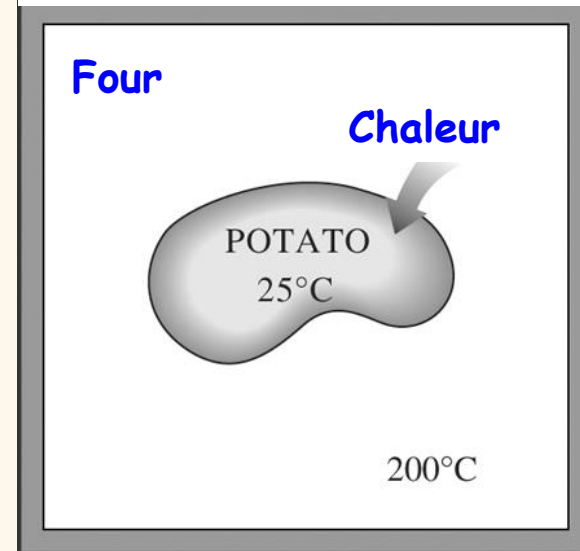
En thermodynamique, quand l'interaction du système avec l'environnement n'est pas le transfert de chaleur (c'est à dire due à une différence de température), c'est du travail.

EXEMPLE

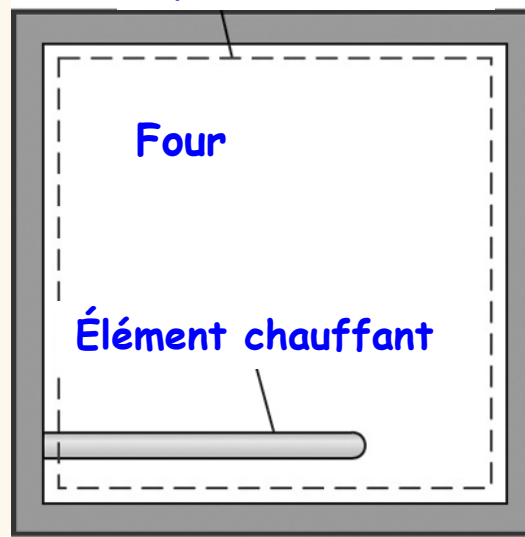
Isolation



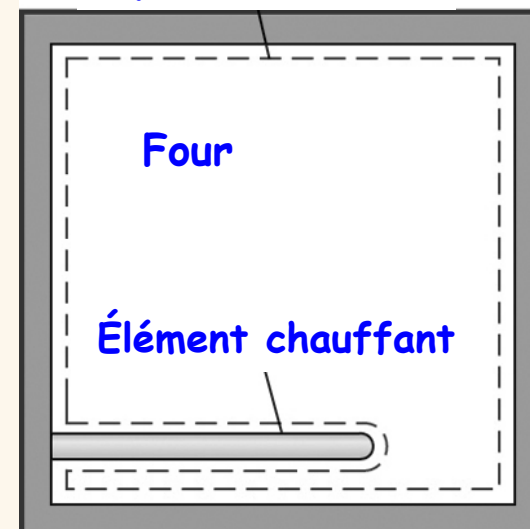
Isolation



Système



Système



4) Premier principe de la thermodynamique (expression générale)

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

$$\Delta E_{\text{ystème}} = E_{\text{final}} - E_{\text{initial}} = E_2 - E_1$$

$$\Delta E_{\text{ystème}} = \Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep$$

Pour les systèmes stationnaires

$$\Delta E_{\text{ystème}} = \Delta U$$

4) Premier principe de la thermodynamique (Système fermé)

$$E_{in} = Q_{in} + W_{in}$$

$$E_{out} = Q_{out} + W_{out}$$

$$\Delta E_{\text{système}} = \Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep$$

$$\Delta E_{\text{système}} = m(u_2 - u_1) + \frac{m}{2}(V_2^2 - V_1^2) + mg(z_2 - z_1)$$

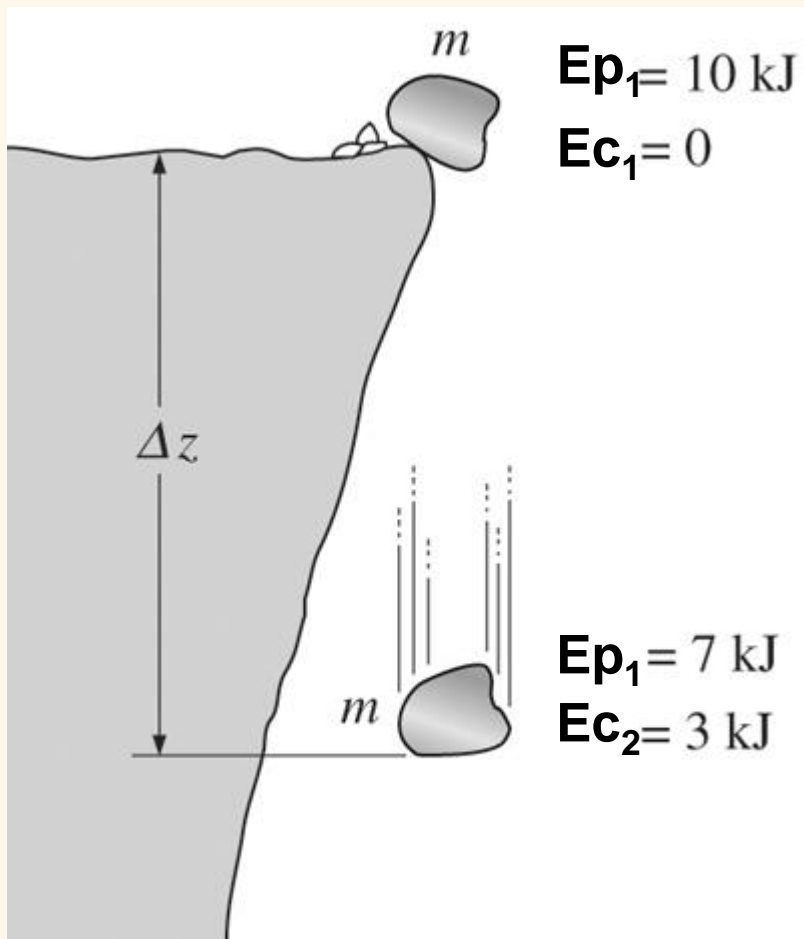
$$(Q_{in} + W_{in}) - (Q_{out} + W_{out}) = \Delta E_{\text{système}}$$

$$Q_{net} = Q_{in} - Q_{out}$$

$$W_{net} = W_{out} - W_{in}$$

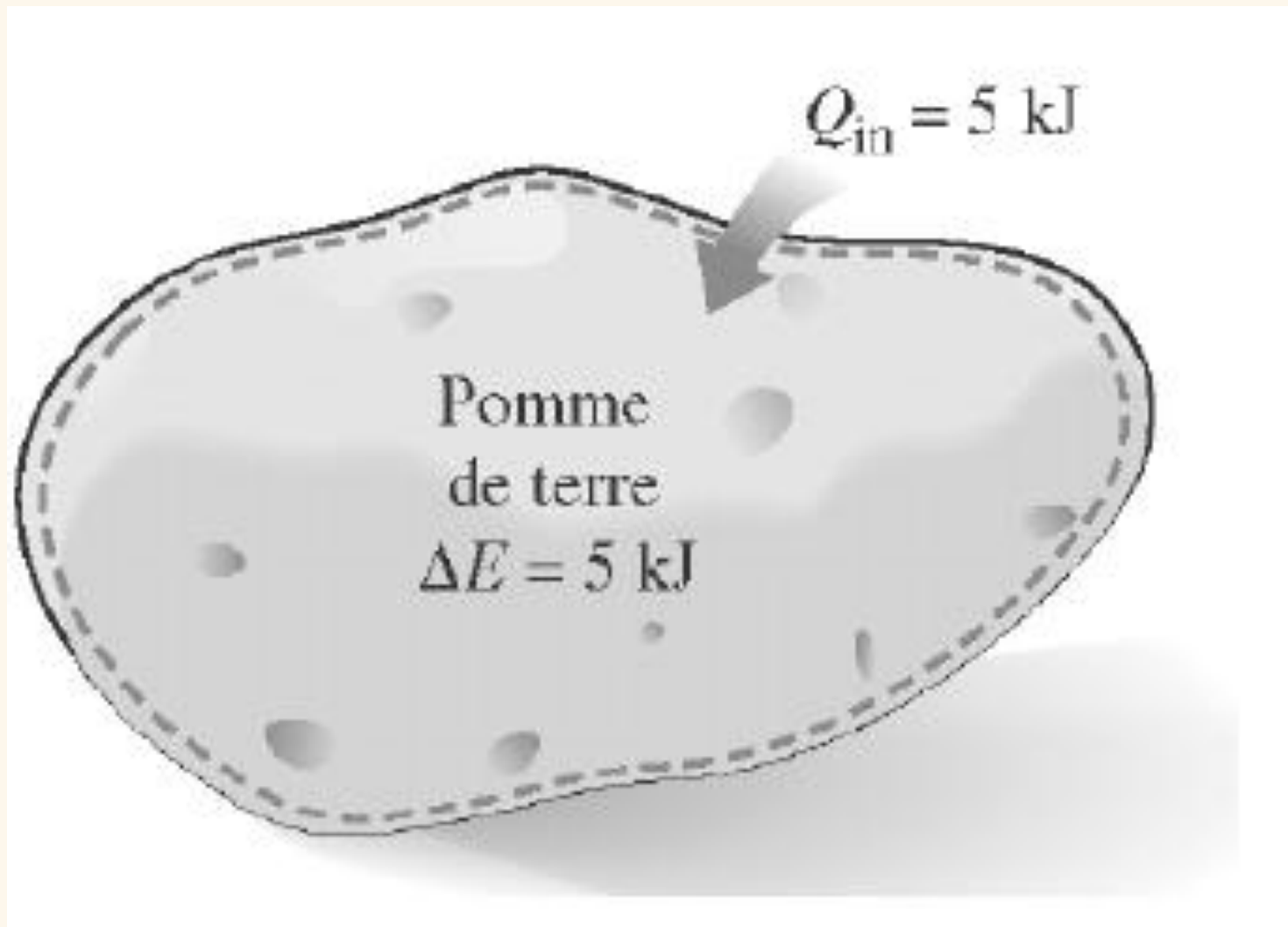
$$Q_{net} - W_{net} = \Delta E_{\text{système}}$$

Exemple1:

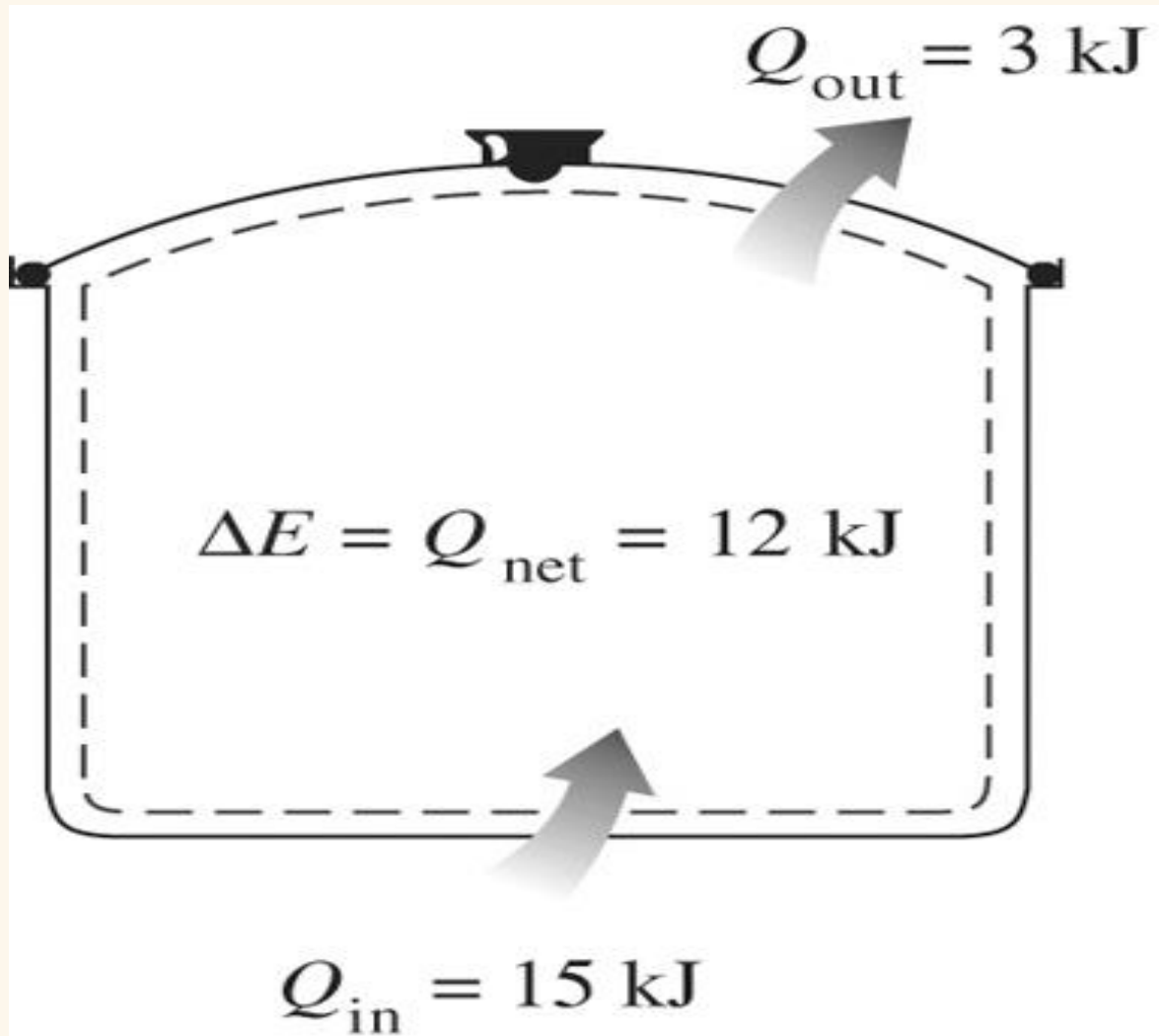


L'énergie n'est ni produite ni détruite. Elle est transformée d'une forme à une autre

Exemple2:

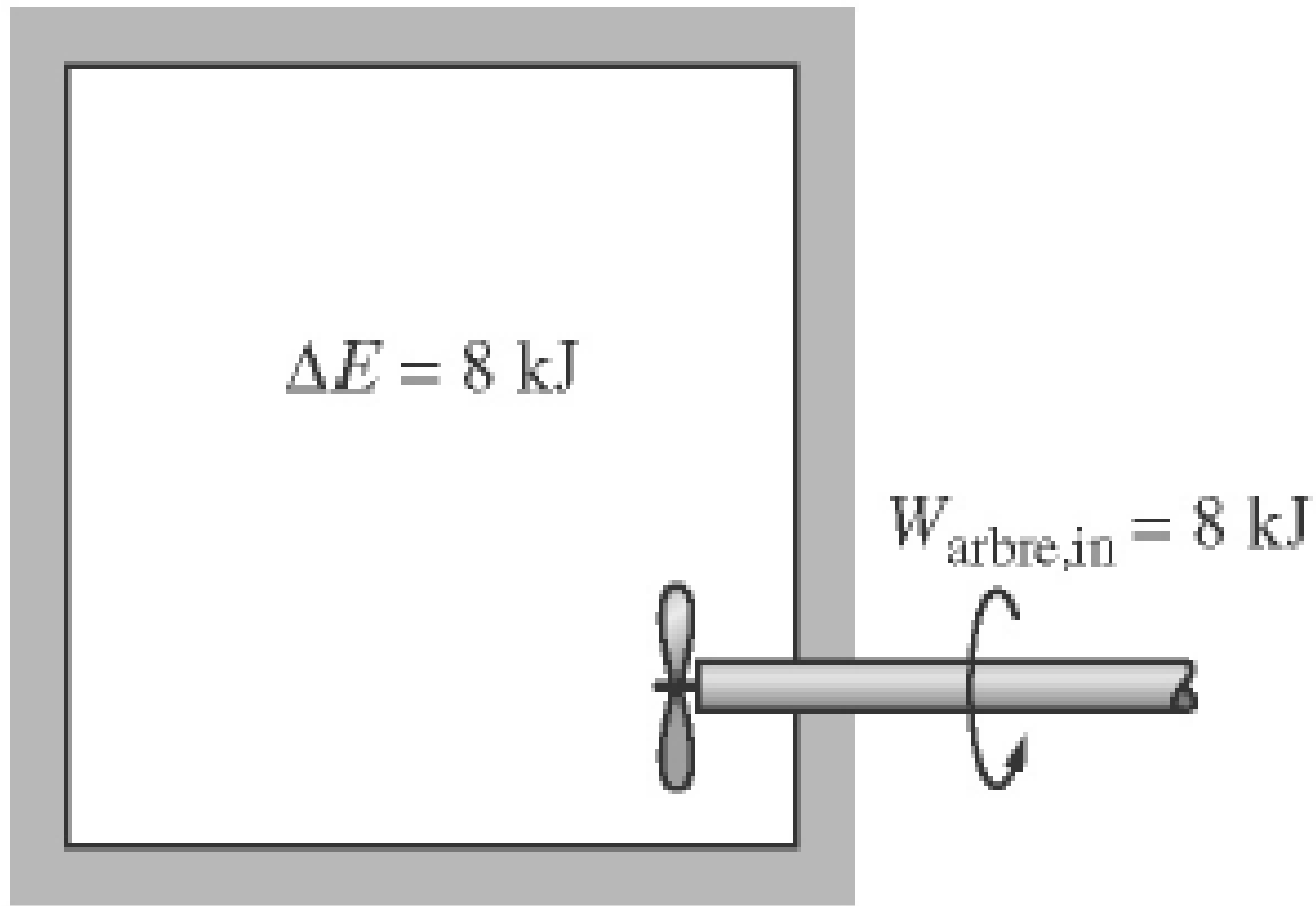


Exemple3:

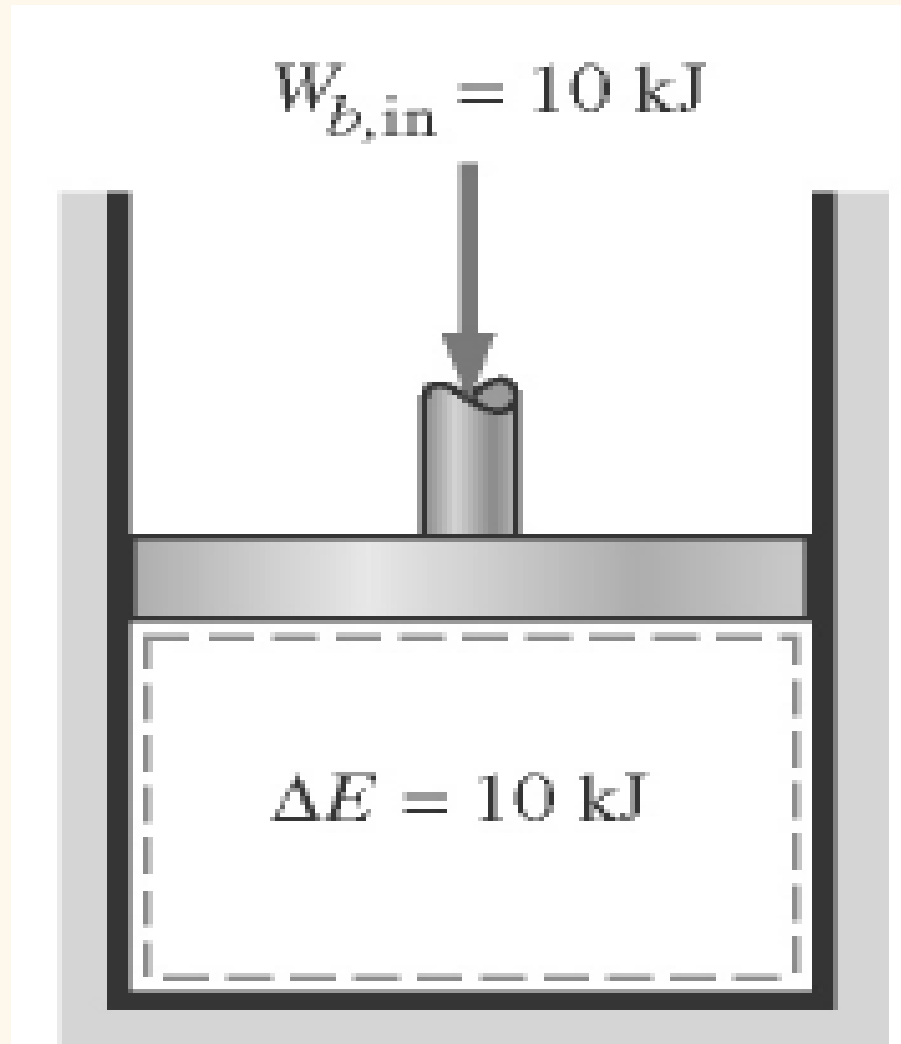


Exemple4:

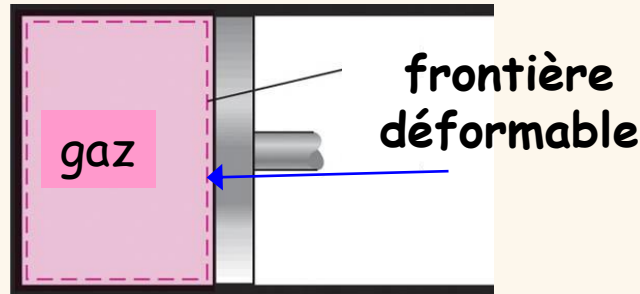
(Système adiabatique)



Exemple5:



5) Bilan d'énergie pour un système fermé



Premier principe (différents formats):

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

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

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

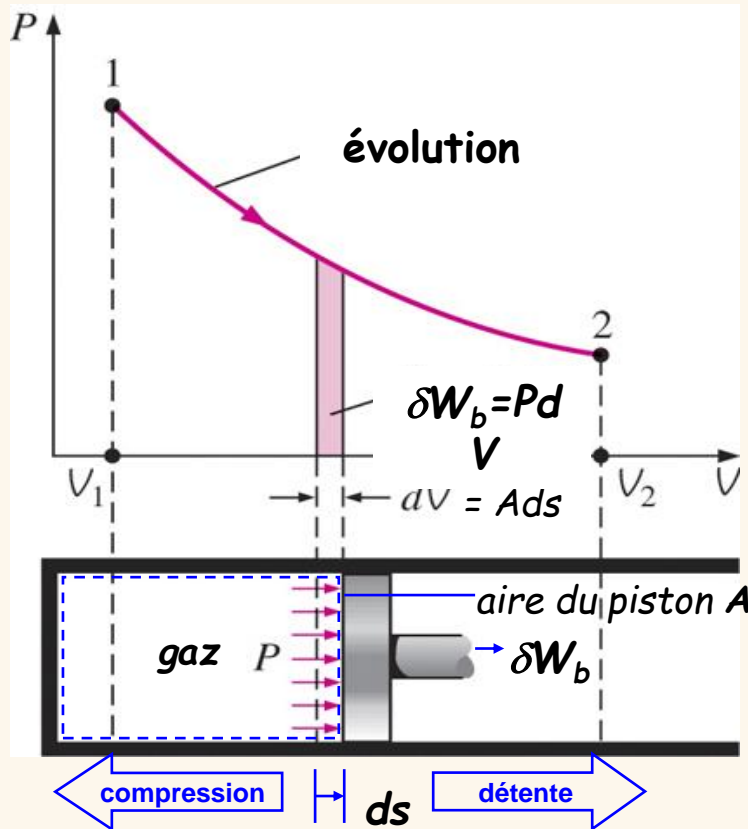
$$W = \underbrace{W_b}_{\downarrow} + \underbrace{W_{autres}}_{\rightarrow}$$

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 .

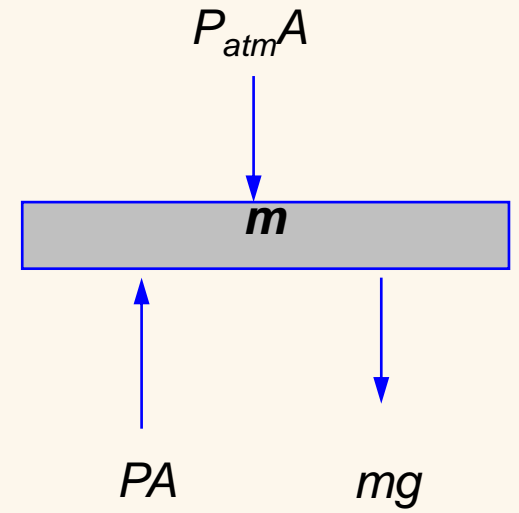
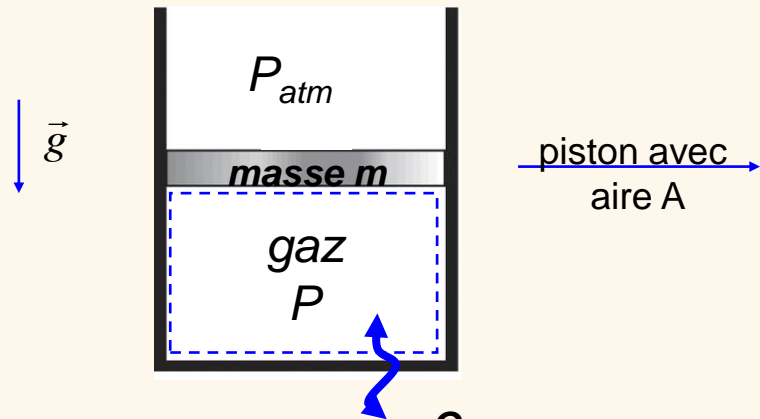
- évolution doit être quasi-statique (accélération $\cong 0$) pour que la pression P du système soit uniforme et par conséquent que les états **entre** 1 et 2 soient définis

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

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

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)



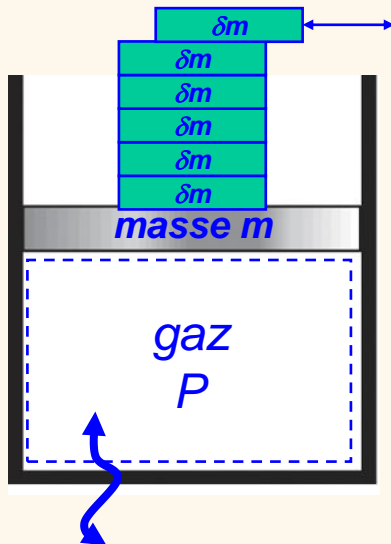
$$\sum F_z = PA - P_{atm}A - mg = ma = 0 \quad (\text{quasi-statique : } a \cong 0)$$

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

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

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

P_{atm}



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 δm)

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

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

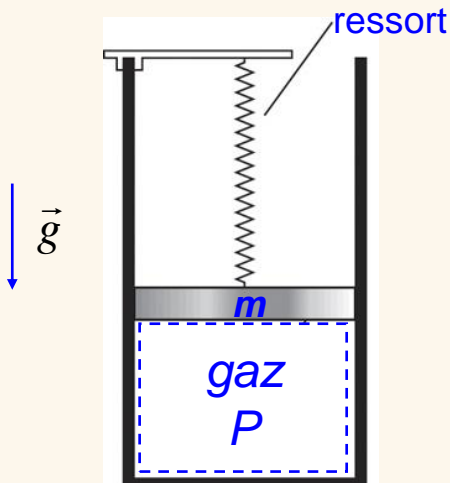
iii) Évolution polytropique ($PV^n = \text{constant}$, $n \neq 1$)

$$PV^n = \text{const.} = C = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

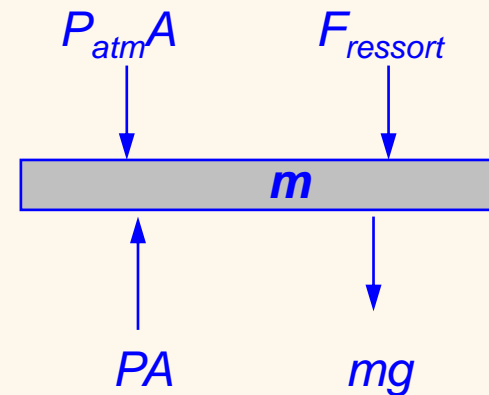
$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} P dV = C \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n} = C \left[\frac{V^{-n+1}}{-n+1} \right]_{V_1}^{V_2} = \frac{1}{1-n} (C V_2^{1-n} - C V_1^{1-n}) = \frac{1}{1-n} (P_2 V_2^n V_2^{1-n} - P_1 V_1^n V_1^{1-n})$$

$$W_b = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} \quad (n \neq 1)$$

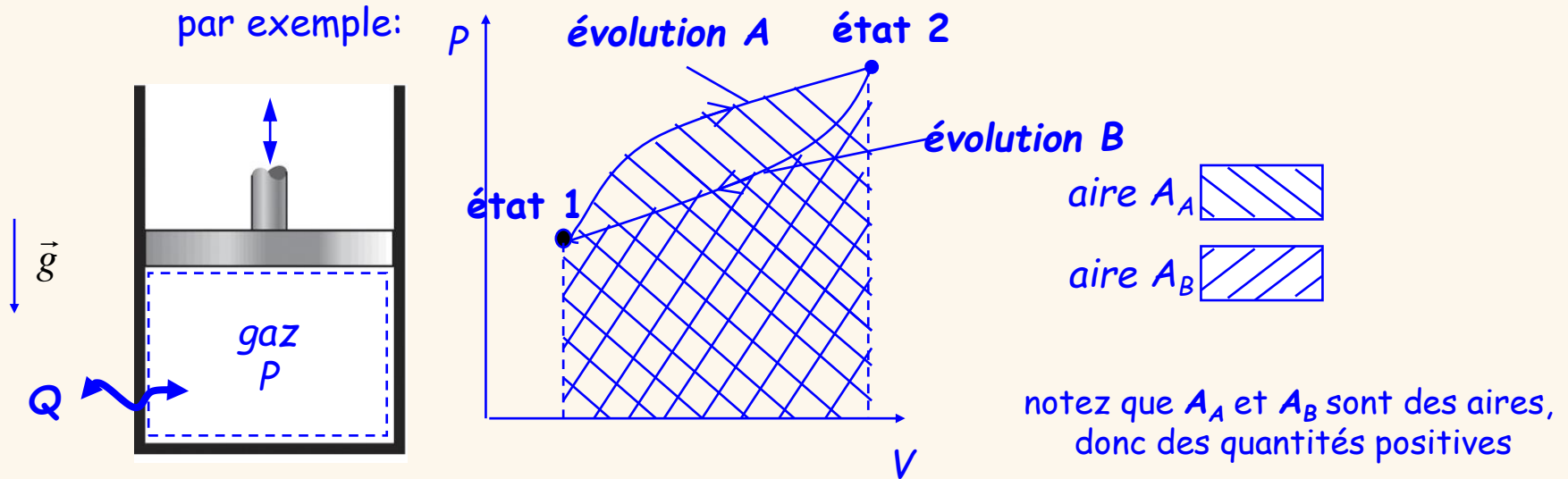
iv) Expansion/compression contre un ressort



Pour trouver $P=f(V)$:



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



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

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

Exemple 3 (en classe): expansion contre un ressort

Exercise

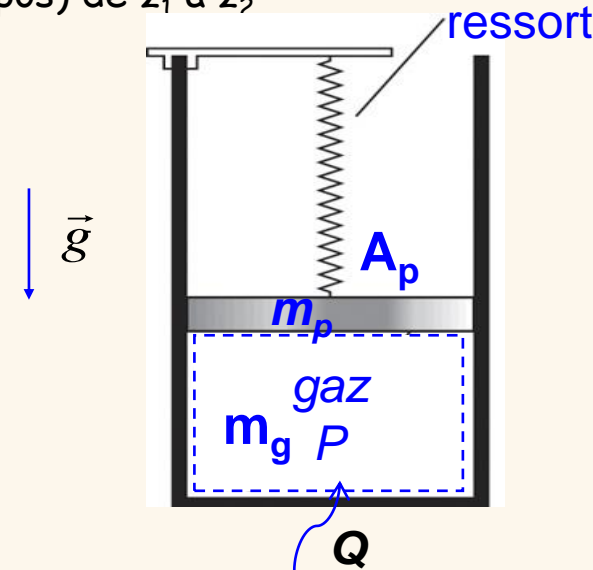
Soit le cylindre-piston de la figure ci-dessous contenant un gaz de masse m_g , on chauffe le système et le piston monte ce qui fait comprimer le ressort (initialement au repos) de z_1 à z_2 .

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.