

MEC1210 THERMODYNAMIQUE

ENSEIGNANT: MARTIN GARIÉPY
BUREAU: JAB-5067
TELEPHONE: (514)340-4711 ext. 7450
COURRIEL: martin.gariepy@polymtl.ca

SEPTEMBRE 2011

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



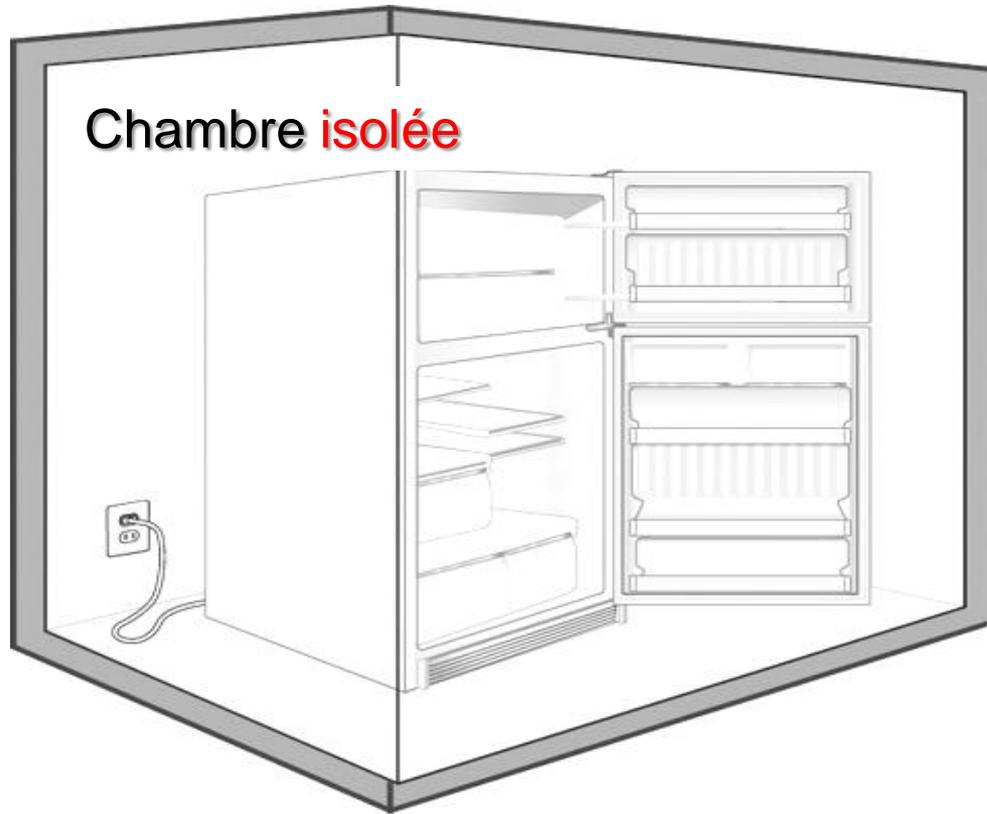
1er principe de la thermodynamique

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

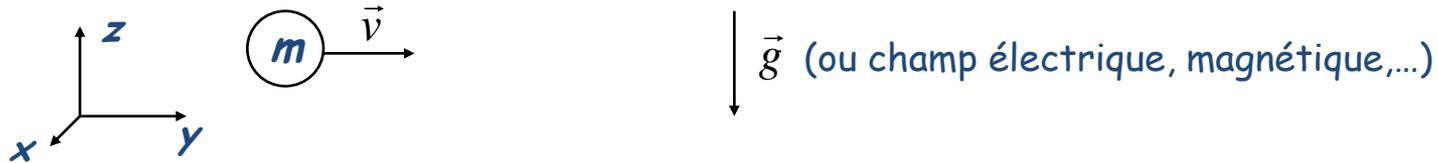


La pièce se refroidit ou se réchauffe?



Les formes d'énergie

Énergie macroscopique: Énergie que **le système en entier** possède par rapport à système de référence



i) **Énergie cinétique:** Énergie due au mouvement dans le système de référence

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad [\text{J}]$$

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

ii) **Énergie potentielle:** Énergie due à la hauteur/position d'un système dans un champ de force gravitationnelle

$$E_p = mgz \quad [\text{J}]$$

$$e_p = \frac{E_p}{m} = gz \quad [\text{J/kg}]$$



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?

Exemple 2

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

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

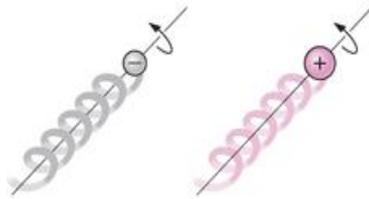


Les formes d'énergie

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 $u=U/M$).

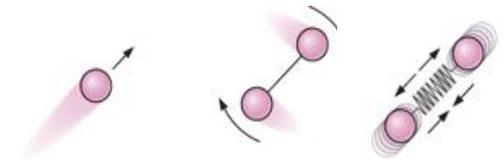
- i) **Énergie sensible:** Énergie cinétique due aux mouvements des molécules/atomes/particules subatomiques (translation, rotation, vibration)



Spin du nucléus

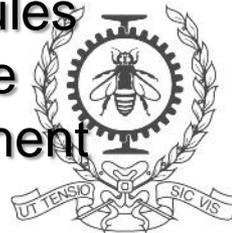


Translation et spin de l'électron



Translation, rotation et vibration moléculaire

- 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.



Les formes d'énergie

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.

■ **Énergie totale d'un système est donnée par:**

$$E_{tot} = E_{macro} + U = E_k + E_p + E_{sensible} + E_{latente} + E_{chimique} + E_{nucléaire}$$

■ **Énergie thermique est une partie de l'énergie interne:**

$$E_{thermique} = E_{latente} + E_{sensible}$$

■ **Énergie est une variable thermodynamique**



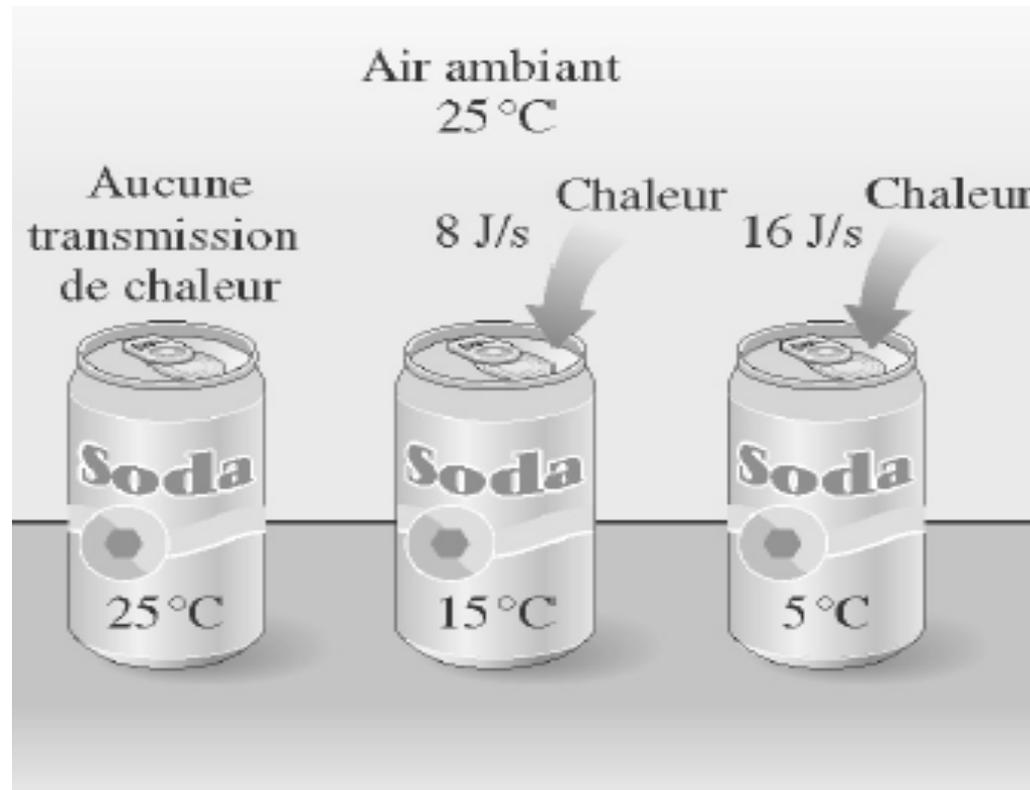
Transfert de chaleur

- Mécanisme de transfert d'énergie **due à une différence de température.**
Dénoté Q [J] ou q [J/kg]
- La chaleur se propage d'un endroit chaud vers un endroit froid
- Positive si ajoutée à un système (ex: Chaudière);
- Négative si dissipée par un système (ex: Condenseur);



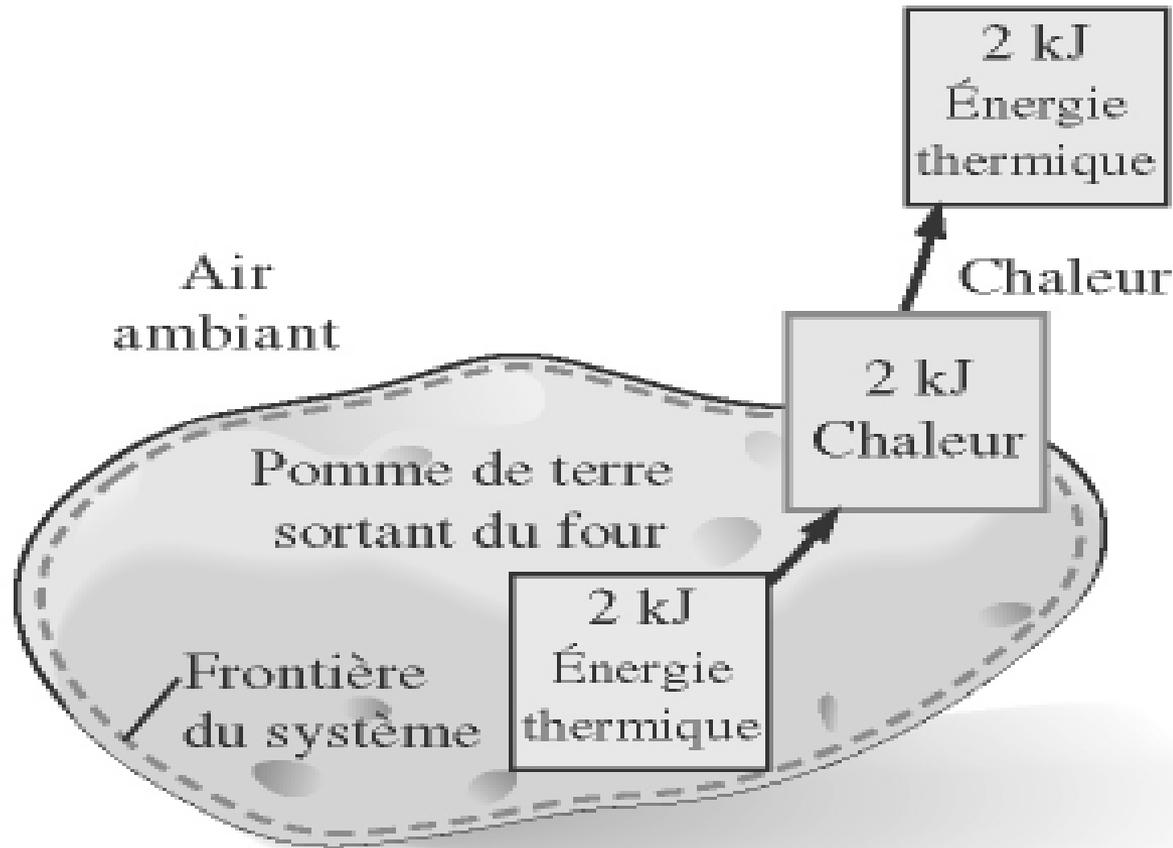
Transfert de chaleur

Si la canette est plus froide que la température ambiante, alors il y aura **un transfert de chaleur** de l'air ambiant vers l'intérieur de la canette.



Transfert de chaleur

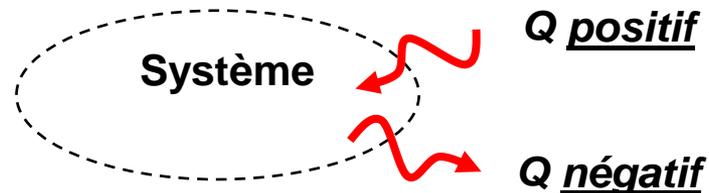
La patate étant plus chaude que l'air ambiant, une partie de son **énergie interne** sera dissipée en chaleur au profit de l'environnement.



Mécanismes de transfert de chaleur

- 1) **Conduction** : TDC survenant dans un SOLIDE ou un fluide AU REPOS par vibrations des structures inter-moléculaires.
- 2) **Convection**: TDC survenant entre un interface fluide/solide ou le fluide est en MOUVEMENT
- 3) **Rayonnement**: TDC survenant par échanges d'ondes électromagnétiques entre 2 corps qui se voient

Convention de signe:



Travail

Mécanisme de transfert d'énergie qui n'est pas un transfert de chaleur.
Exemple: Un piston qui comprime un gaz effectue un TRAVAIL

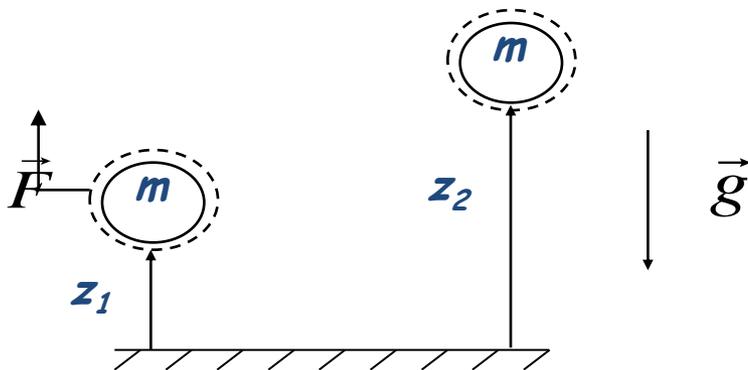
Procédé adiabatique

- Procédé ne faisant intervenir aucun transfert de chaleur
- Ne pas confondre avec un procédé isotherme ... La température peut varier, dû à un travail, dans un procédé adiabatique...
- Exemple: Un réservoir d'eau chaude chauffée par le passage d'un courant électrique: Aucun transfert de chaleur avec l'extérieur (donc adiabatique) mais travail effectué à l'intérieur pour augmenter la température de l'eau par le passage d'un courant électrique.



Travail

- Mécanisme de transfert d'énergie dont le seul résultat *équivalent* aurait pu être l'élévation d'une masse. Dénoté W [J] ou w [J/kg]
- Le travail est une force multiplié par la distance (ou le déplacement) induit par cette force
- Exemple: Déplacement d'une masse contre la gravité:



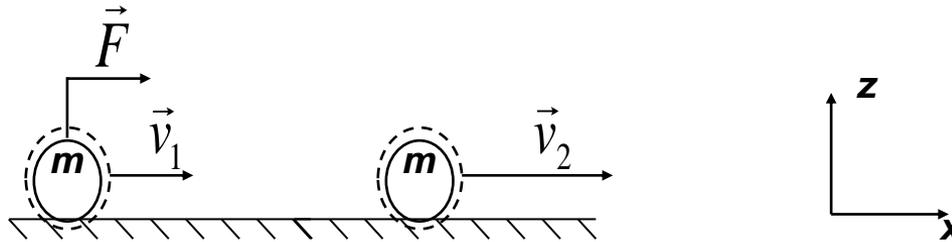
$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{1 \rightarrow 2} F dz = \int_{z_1}^{z_2} mg dz = mg(z_2 - z_1)$$

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



Travail

- Exemple: accélération d'une masse



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

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

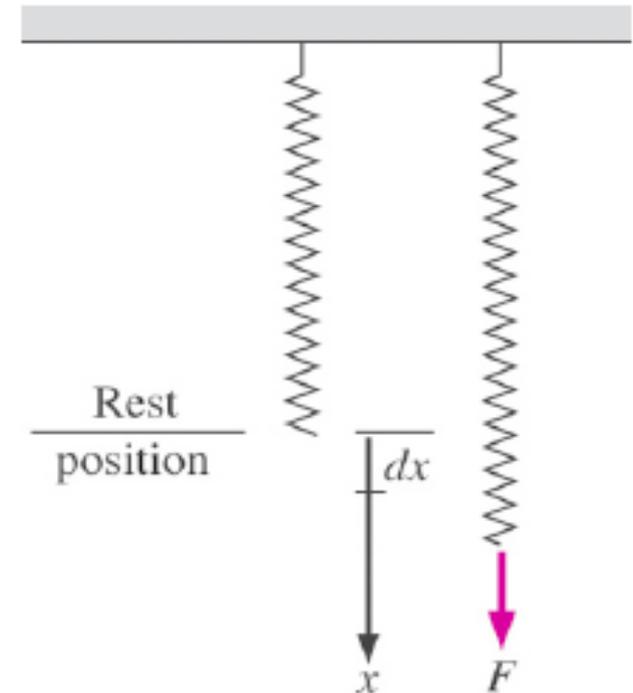
$$W_{1 \rightarrow 2} = \Delta E_{\text{cinétique, sys } 1 \rightarrow 2}$$



Travail

- Exemple: Travail fait par un ressort (Force de rappel exercée lors de la compression ou l'élongation d'un ressort)
- La force se calcul par: $F = kx$
- Le travail se calcul par:

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



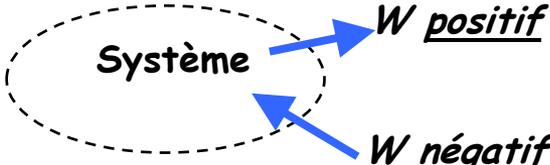
Types de travail

- i) **Mécanique:** (Travail) $W = \text{force (F)} \times \text{déplacement (s)}$
 (Travail) $W = \text{couple (T=F*r)} \times \text{déplacement angulaire } (\theta)$
 (Puissance) $\dot{W} = \text{force(F)} \times \text{vitesse (v)}$
 (Puissance) $\dot{W} = \text{couple(T)} \times \text{vitesse angulaire}(\omega)$
- ii) **Électrique:** (Travail) $W = \text{différence de voltage (V)} \times \text{nombre de charges électriques (N)}$
 (Puissance) $\dot{W} = \text{différence de voltage(V)} \times \text{courant(I)}$
- iii) **Autres (magnétiques etc).**



Notes

- Taux de travail (puissance): [Joule/sec] ou [Watt]

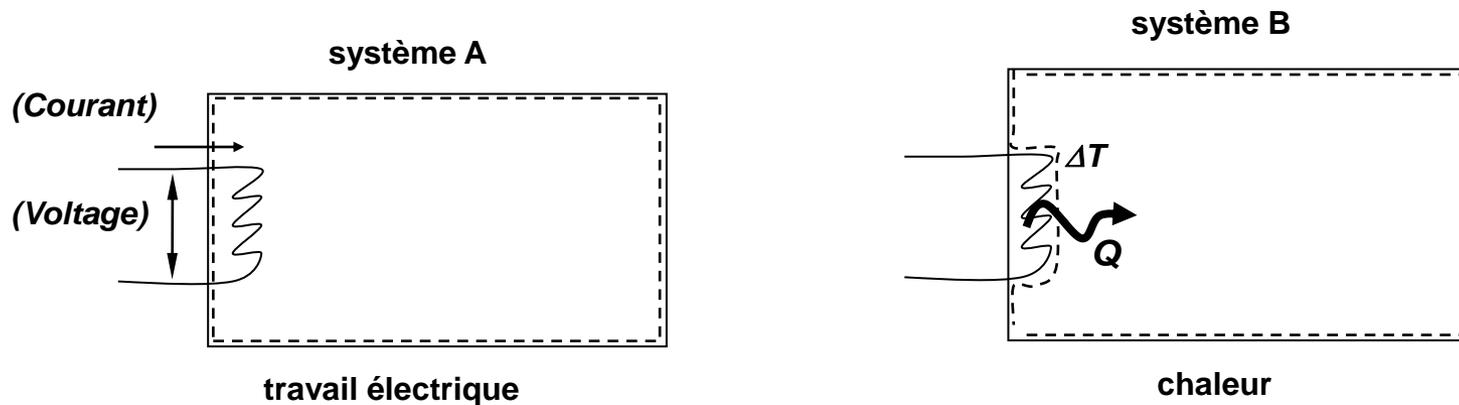
- Convention de signe: The diagram shows a dashed oval labeled "Système". A blue arrow points from the system to the right, labeled W positif. Another blue arrow points from the right towards the system, labeled W négatif.

- L'énergie est une propriété (variable thermodynamique) d'un système
- Le travail et le TDC ne le sont pas !



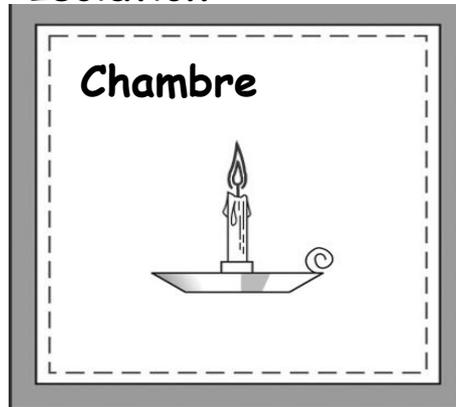
Notes

- 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; regardez ce qui traverse la frontière du système choisi.

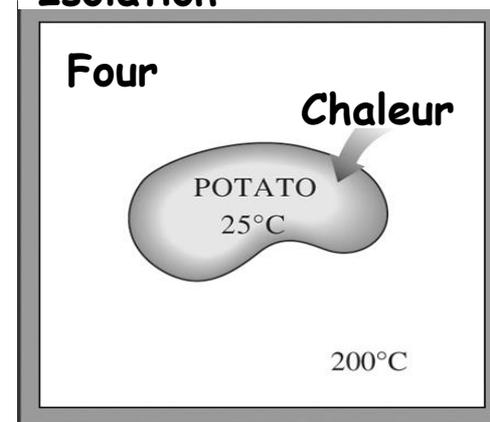


EXEMPLES

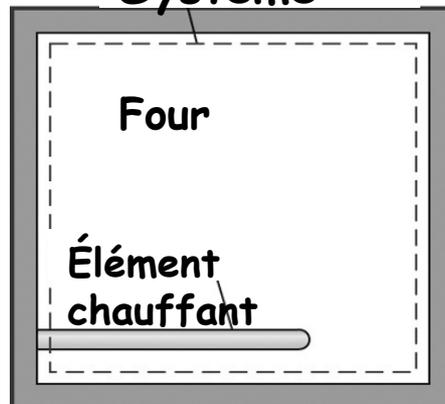
Isolation



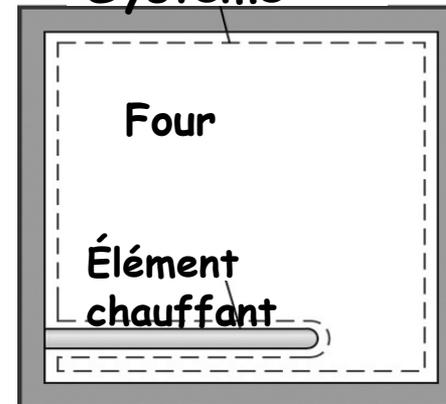
Isolation



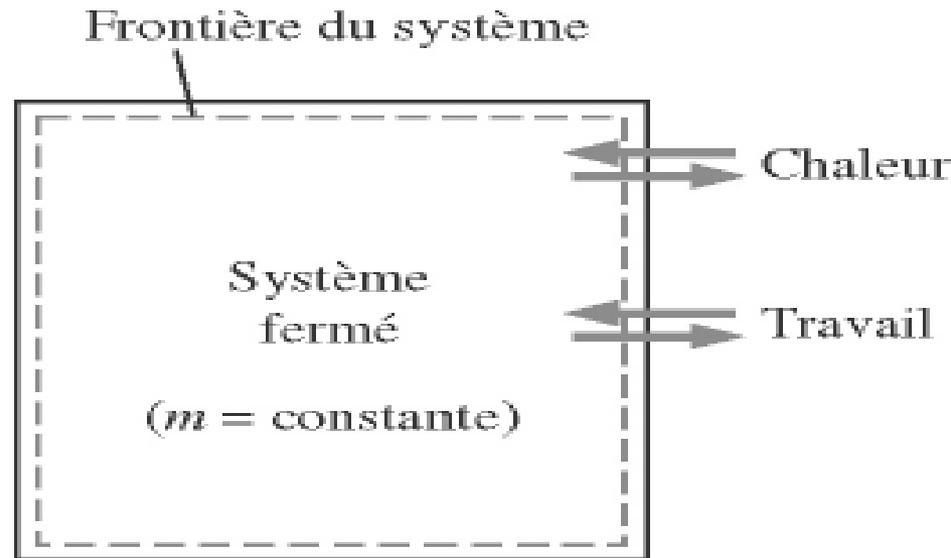
Système



Système



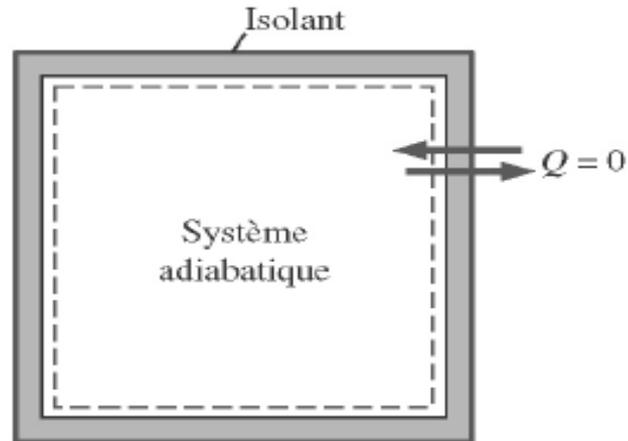
RAPPEL



Seul l'énergie peut traverser les frontières d'un système fermé, soit par un TDC. ou par un travail (pas de transfert de masse)



RAPPEL



Aucun TDC durant un procédé adiabatique



Première loi de la thermodynamique

□ PRINCIPE DE CONSERVATION D'ÉNERGIE:

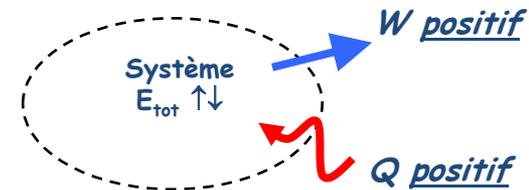
“Rien ne se perd, rien ne se crée, mais tout se transforme (Antoine Lavoisier)”

- La variation d'énergie d'un système est égale à la différence entre le transfert de chaleur et le travail:

$$\Delta E_{tot,sys} = Q_{(au\ sys)} - W_{(par\ sys)} \quad [\text{kJ/kg}]$$

$$\dot{E}_{tot,sys} = \dot{Q} - \dot{W} \quad [\text{W}]$$

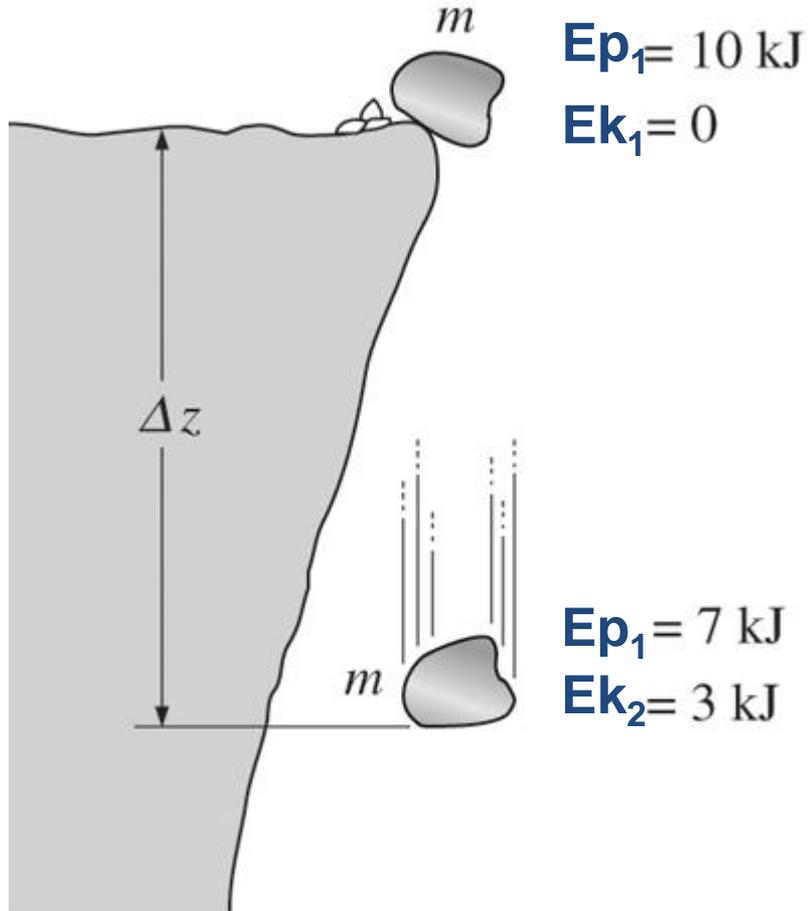
$$\Delta e_{tot,sys} = q - w \quad [\text{kJ}]$$



- Rappel: L'énergie totale est : $E_{tot} = E_c + E_p + U$



Exemple

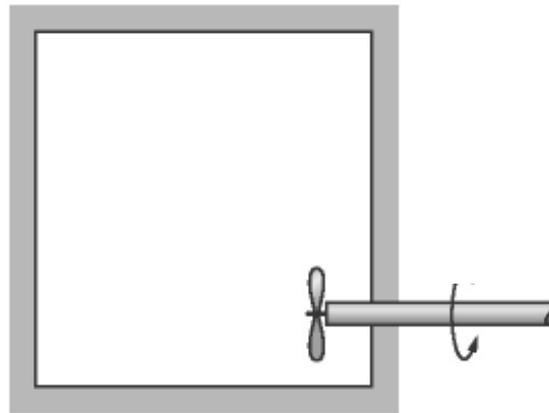


L'énergie n'est ni produite ni détruite. Elle est transformée d'une forme à une autre



Exemple p.61

Soit un réservoir rigide contenant un fluide chaud. Le fluide est refroidi alors qu'il est brassé à l'aide d'un agitateur. Au départ, l'énergie interne du fluide est de 800 kJ. Le fluide perd 500 kJ de chaleur au cours du refroidissement, pendant que l'agitateur fait 100 kJ de travail sur le fluide. Déterminez l'énergie interne finale du fluide.



Exemple p.62

On prétend qu'un ventilateur dont la puissance électrique consommée est de 20W souffle 1.0 kg/s d'air à une vitesse de 8m/s. Cet énoncé est-il exact ?

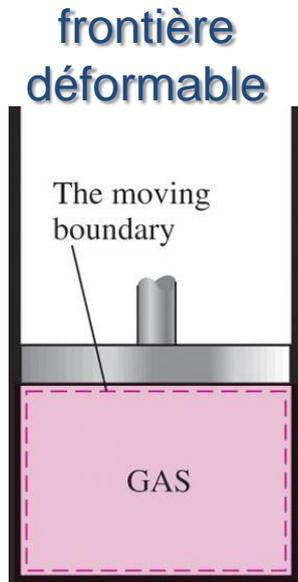


Exemple p.63

Une salle de classe est éclairée au moyen de 30 ampoules fluorescentes, chacune consommant 80 W d'électricité. Les ampoules sont allumées 12 heures par jour, 250 jours par année. Si le prix du kWh est de 0.07\$, déterminez le coût annuel en éclairage.



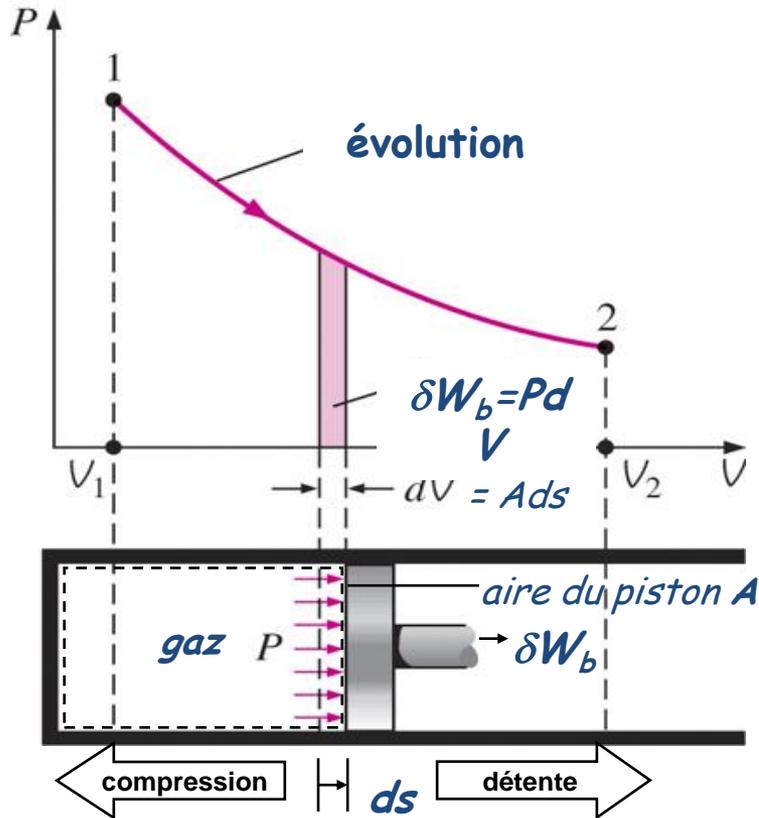
Bilan d'énergie pour un système fermé déformable



- $\Delta E_{tot,sys} = Q_{(au\ sys)} - W_{(par\ sys)}$
- Le travail est donnée par: $W = W_b + W_{autres}$
- W_b est le travail effectué par la frontière
- **Travail de frontière:** Travail mécanique associé au mouvement de la frontière [W_b]



Travail de frontière effectué lors d'une détente / compression



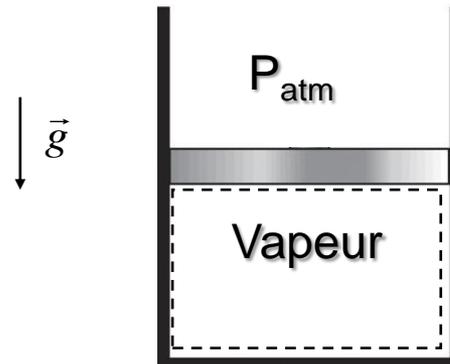
$$\delta W_b = F \cdot ds = PA \cdot ds = PdV$$

$$W_b = \int_1^2 \delta W_b = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$



Exemple p. 144

Soit un système piston-cylindre renfermant 10 kg de vapeur d'eau surchauffée à 200°C et à 200 kPa. De la chaleur est ajoutée au cylindre jusqu'à ce que la température de la vapeur d'eau atteigne 400°C. Déterminez le travail fait pendant l'évolution si cette évolution peut-être considérée quasi-statique.



Exemple p. 145

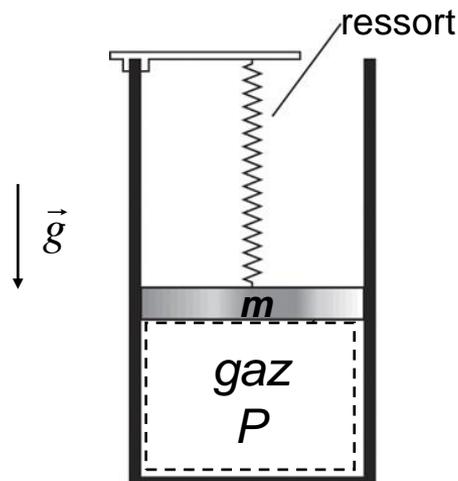
Soit un système piston-cylindre renfermant 0.4 m^3 d'air à 80°C et à 100 kPa . L'air est comprimé à 0.1 m^3 , de telle sorte que la température à l'intérieur du cylindre demeure constante. Déterminez le travail fait pendant l'évolution.



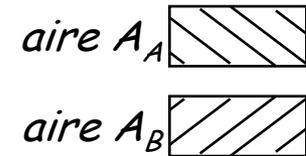
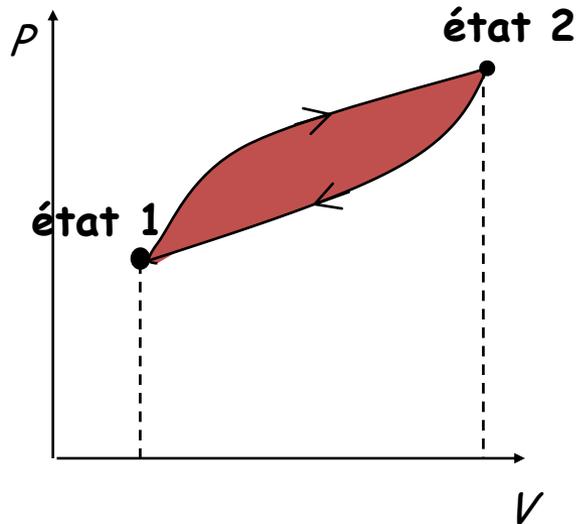
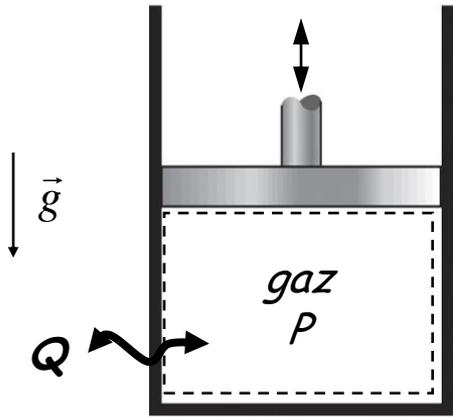
Évolution polytropique

$$\square PV^n = \text{const.} = C = P_1V_1^n = P_2V_2^n \quad (\text{évolution polytropique})$$

$$\square W_b = \int_{V_1}^{V_2} PdV = C \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n} \quad (\text{Travail de frontière effectué lors d'une évolution polytropique})$$



Travail lors d'un CYCLE (compression / détente)



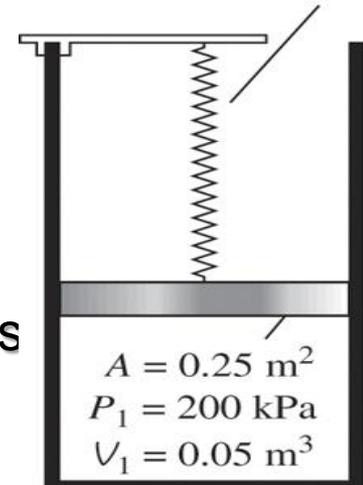
$$W_{cycle} = W_A + W_B = \int_1^2 PdV + \int_2^1 PdV$$



Exemple p. 146

Soit un système piston-cylindre renfermant 0.05m^3 d'un gaz dont la pression initiale est de 200 kPa . Dans cet état, un ressort, dont la constante est de $k=150\text{ kN/m}$, effleure le piston. De la chaleur est alors transmise au gaz dans le cylindre. Le gaz se détend, soulevant le piston qui comprime le ressort, et le volume du gaz double. La section du piston est de 0.25 m^2 . Déterminez:

- La pression finale dans le cylindre
- Le travail total fait par le gaz
- La fraction du travail total utilisée pour comprimer le res



Lectures recommandées

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, 2008.

