

MEC1210 - Heures 5 à 8

I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique

II) Notions de base et définitions

III) **1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes fermés)**

heures 5, 6 

- *La notion d'énergie*
- *Transfert de chaleur*
- *Travail*
- *1^{er} principe de la thermodynamique (expression générale)*
- *Bilan d'énergie appliqué à un système fermé*

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2^{ème} principe de la thermodynamique

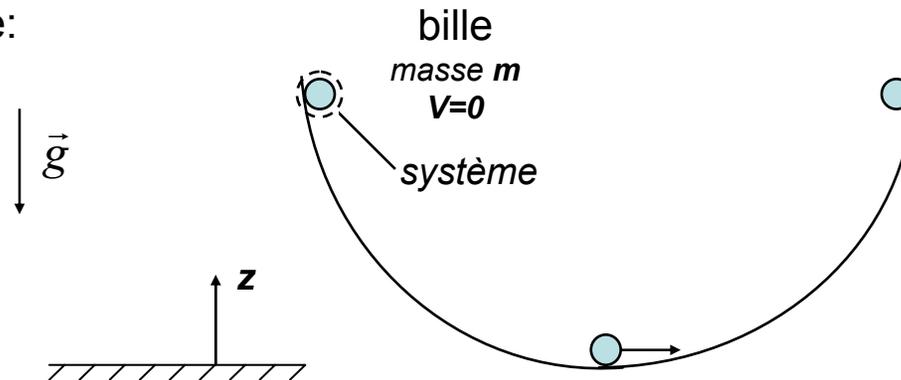
VII) Entropie

VIII) Cycles thermodynamiques communs

IX) Mélanges non réactifs

III) Premier principe de la thermodynamique

Considérons l'exemple:



Conservation de l'énergie (Physique 101):

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

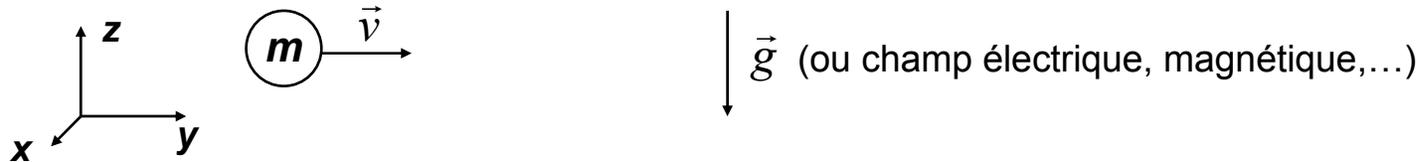
Considérez maintenant qu'il y ait traînée, friction (pertes) et changement de température de la bille. Il faudrait donc ajouter des termes dans cette équation, notamment:

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

1) La notion 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

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

$$e_c = \frac{E_c}{m} = \frac{1}{2}v^2$$

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.)

$$E_p = mgz$$

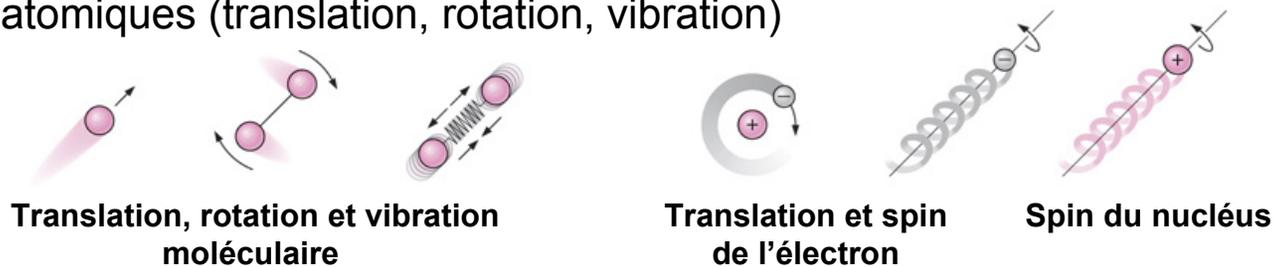
$$e_p = \frac{E_p}{m} = gz$$

b) Énergie microscopique (interne)

Énergie reliée 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

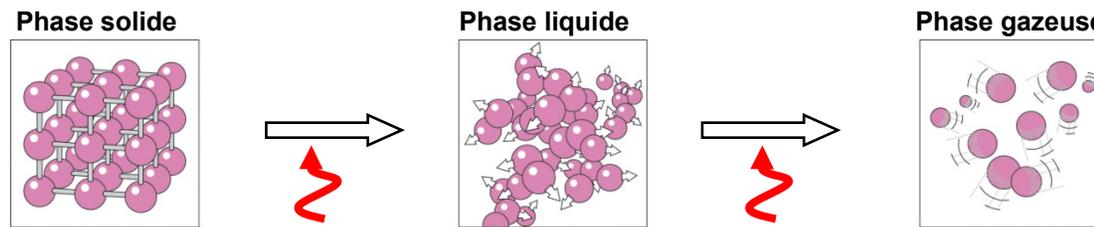
Énergie cinétique due aux mouvements des molécules/atomes/particules subatomiques (translation, rotation, vibration)



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

→ Énergie interne ↑

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

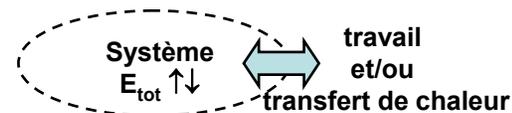
Énergie associée aux forces de liaison dans le noyau de l'atome.

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

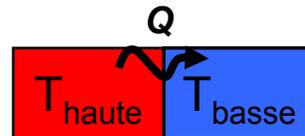
a) Définition

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)

b) Mécanismes de transfert de chaleur

i) Conduction

Transmission de chaleur par contact entre deux éléments



ii) Convection

Transfert de chaleur entre une surface solide et un fluide adjacent en mouvement.



iii) Radiation

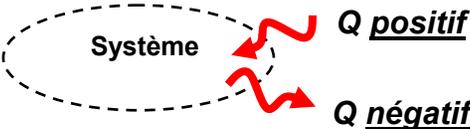
Transfert d'énergie par radiation électromagnétique.

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: $\dot{Q} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}$ [Joule/sec] ou [Watt]

- Convention de signe: 

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

3) Travail

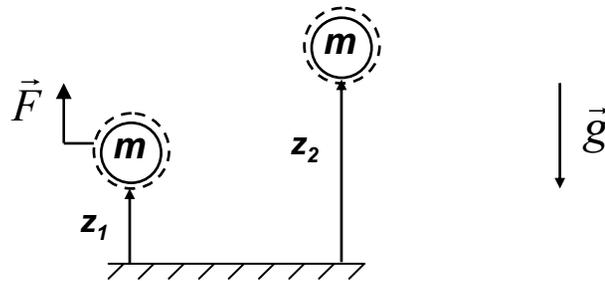
a) Définition

Mécanisme de transfert d'énergie dont le seul résultat équivalent aurait pu être l'élévation d'une masse. Ce transfert est dénoté par W , dont 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:

Physique 101: travail = force x déplacement (point de vue mécanique)

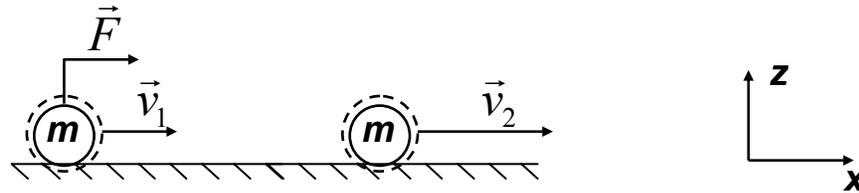
ex. 1: Élévation d'une masse



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

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

ex. 2: Accélération d'une masse

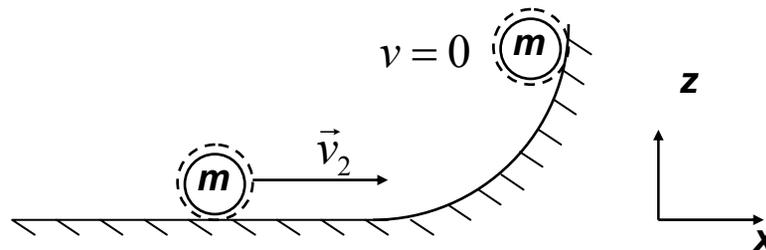


$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{1 \rightarrow 2} F dx = \int_{1 \rightarrow 2} m a dx = \int_{1 \rightarrow 2} m \frac{dv}{dt} dx = \int_{1 \rightarrow 2} m dv \frac{dx}{dt}$$

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

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

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



b) Types de travail

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

ou

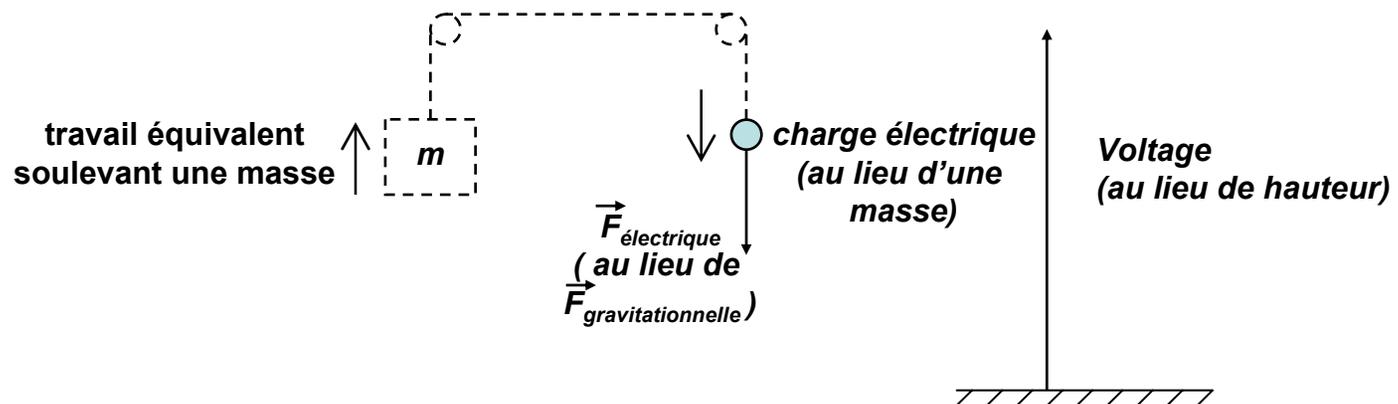
$W = \text{couple } (T = F \cdot r) \times \text{déplacement angulaire } (\theta)$

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

et

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

Équivalence mécanique:



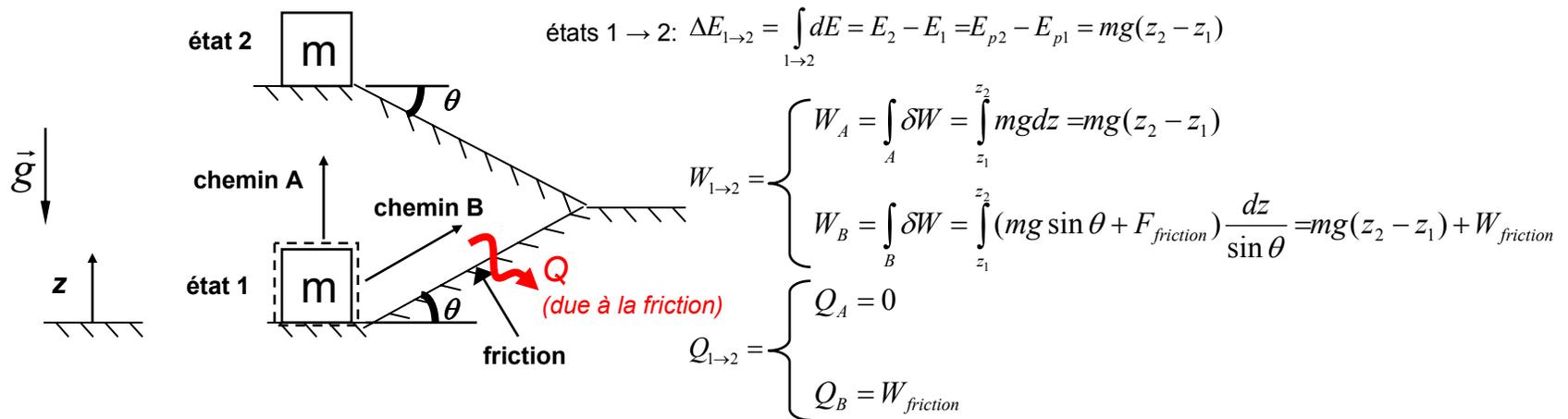
iii) Autres: magnétique (même équivalence mécanique que pour travail électrique)

c) Notes

- Taux de travail (puissance): $\dot{W} \equiv \frac{dW}{dt}$ [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:

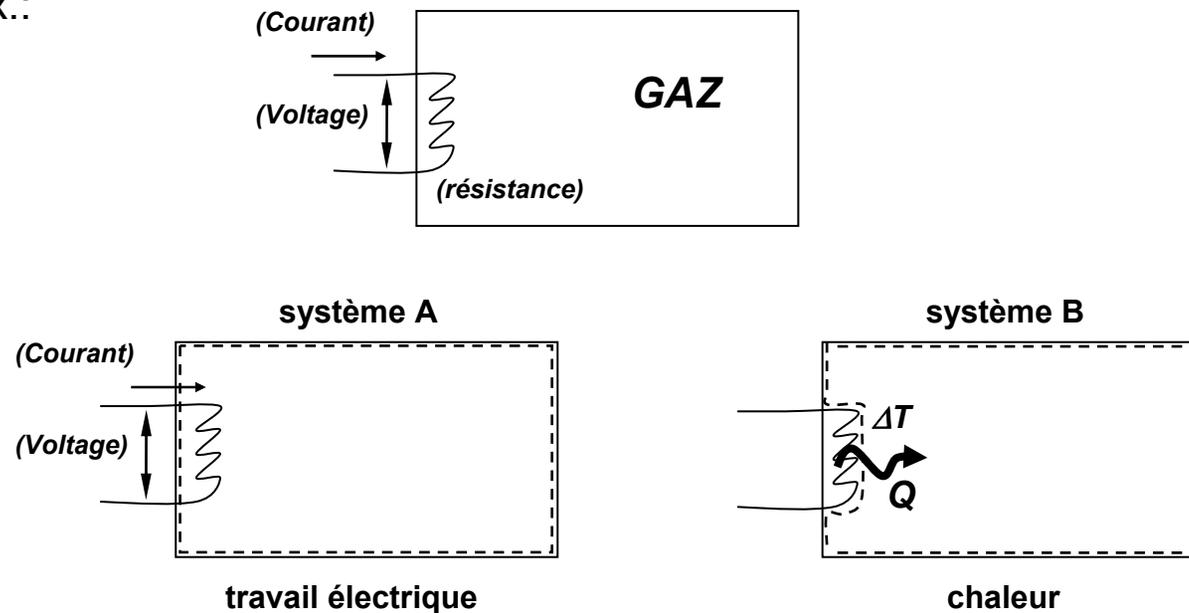


Énergie, étant une propriété, dépend de l'état et non des détails de l'interaction avec l'environnement (évolution). On dénote donc un petit changement d'énergie par dE . Par ailleurs, W et Q dépendent de ces détails. On doit donc dénoter un petit travail et un petit transfert de chaleur par δW et δQ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

ex.:



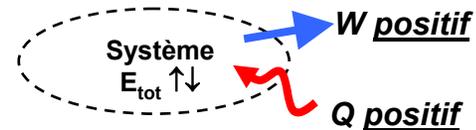
- En thermodynamique, quand l'interaction du système avec l'environnement n'est pas le transfert de chaleur (c'est à dire due à une différence de température), c'est du travail.

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.

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

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

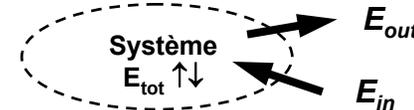


Autres formes:

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) (x 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 $W = Q$

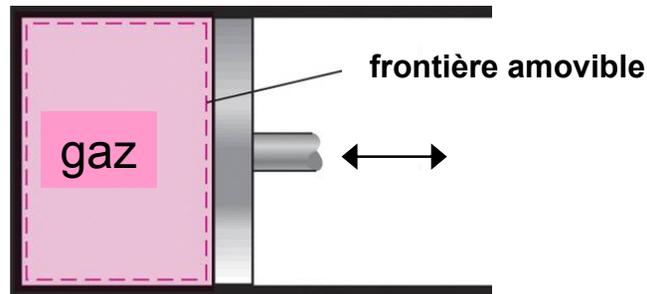
Exemples 1 et 2 (en classe)

Où on en est

- I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique
- II) Notions de base et définitions
- III) **1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes fermés)**
 - *La notion d'énergie*
 - *Transfert de chaleur*
 - *Travail*
 - *1^{er} principe de la thermodynamique (expression générale)*
- heures 7, 8  - **Bilan d'énergie appliqué à un système fermé**
- IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles
- V) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)
- VI) 2^{ème} principe de la thermodynamique
- VII) Entropie
- VIII) Cycles thermodynamiques communs
- IX) Mélanges non réactifs

III) 1er principe de la thermodynamique (cont.)

5) Bilan d'énergie pour un système fermé



Premier principe (différents formats): $\Delta E_{tot,sys} = Q_{(au\ sys)} - W_{(par\ sys)}$

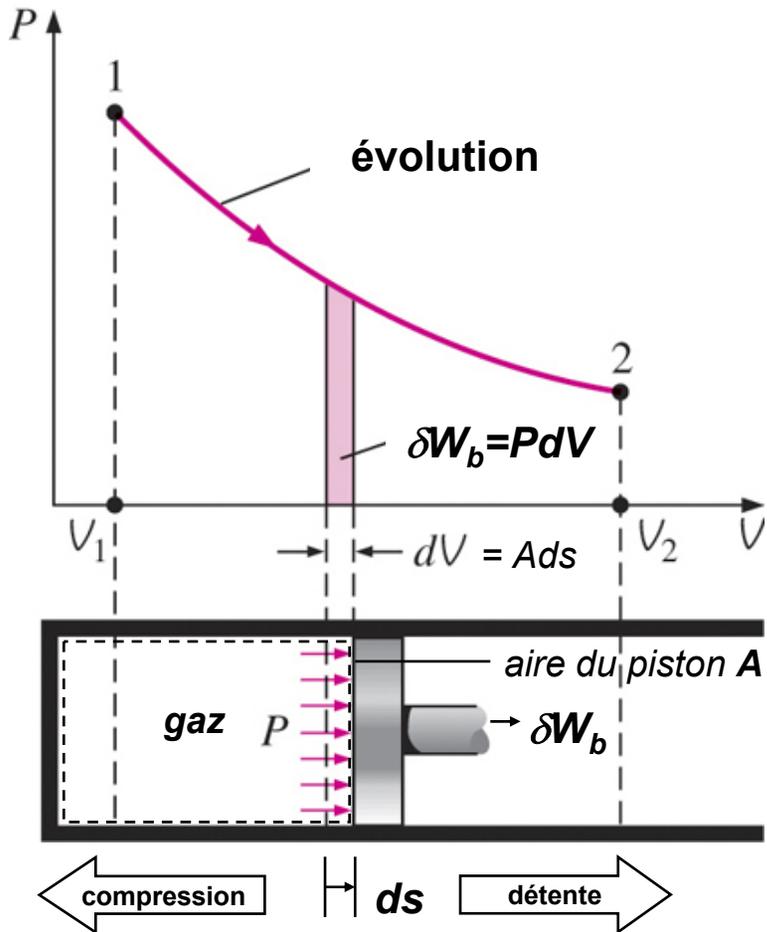
$$\Delta e_{tot,sys} = q - w$$

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

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

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

Travail de frontières effectué lors d'une détente/compression



Notes:

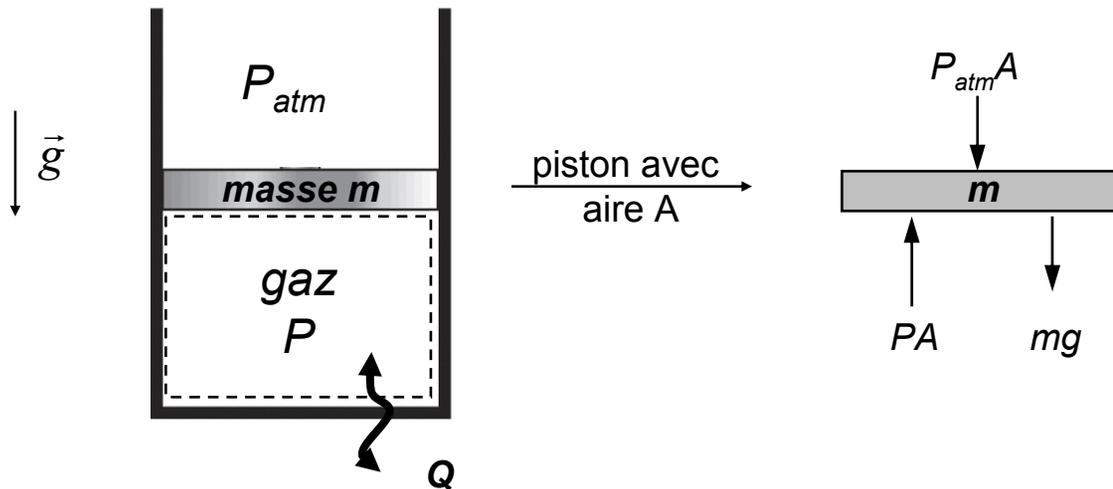
- travail de détente ($V_{final} > V_{initial} : W_b > 0$, travail **par** système) et de compression ($V_{final} < V_{initial} : W_b < 0$, travail **sur** système). Donc les limites de l'intégral PdV prendront soin du signe de W_b .
- évolution doit être quasi-statique (accélération $\cong 0$) pour 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 W_b associé:

i) Évolution isobarique (pression constante)

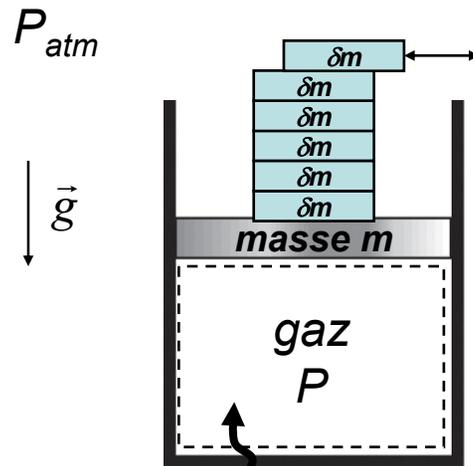


$$\sum F_z = PA - P_{atm} A - mg = ma = 0 \quad (\text{quasi - statique : } a \cong 0)$$

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

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

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



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)

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

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

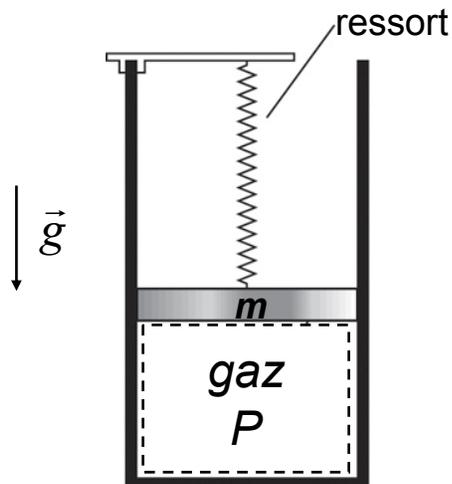
iii) Évolution polytropique ($PV^n = \text{constant}$, $n \neq 1$)

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

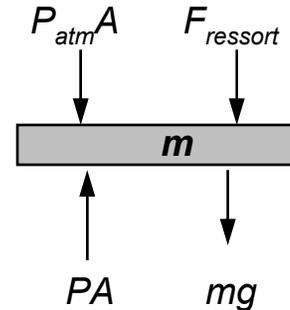
$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} PdV = C \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n} = C \left[\frac{V^{-n+1}}{-n+1} \right]_{V_1}^{V_2} = \frac{1}{1-n} (CV_2^{1-n} - CV_1^{1-n}) = \frac{1}{1-n} (P_2V_2^n V_2^{1-n} - P_1V_1^n V_1^{1-n})$$

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

iv) Expansion/compression contre un ressort



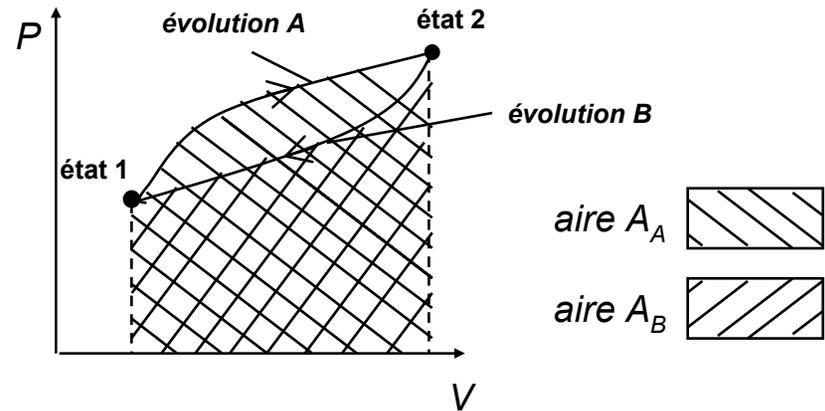
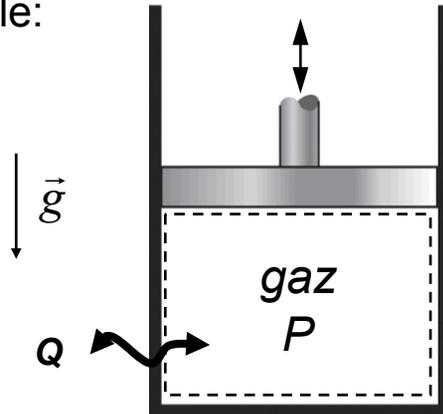
Pour trouver $P=f(V)$:



(voir exemple en classe)

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

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

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

Exemple 3 (en classe): expansion contre un ressort