

# OÙ ON EN EST

I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique

II) Notions de base et définitions

III) **1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes fermés)**

heures 5



- **La notion d'énergie**
- **Transfert de chaleur**
- *Travail*
- *1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (expression générale)*
- *Bilan d'énergie appliqué à un système fermé*

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique

VII) Entropie

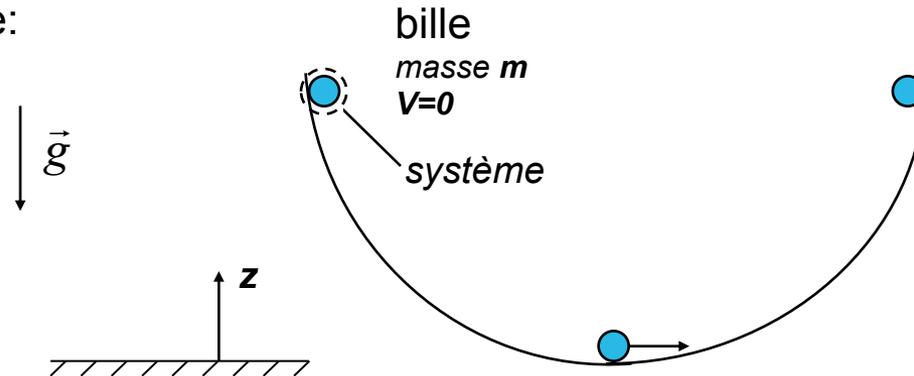
VIII) Cycles thermodynamiques communs

IX) Mélanges non réactifs



# 1<sup>ER</sup> 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:

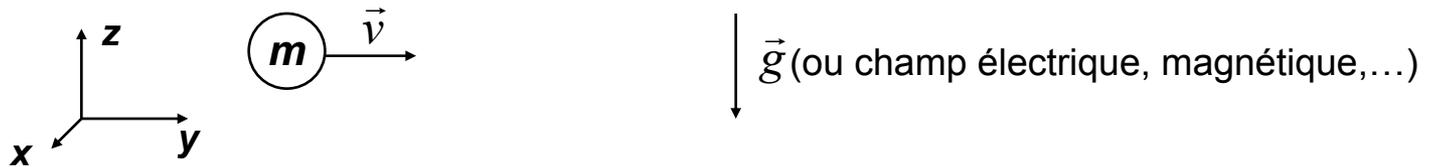
- i) Énergie interne (température)
  - ii) Travail (friction, traînée)
  - iii) Transfert de chaleur
- } Mécanismes de changement d'énergie



# 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.)

$$E_p = mgz$$

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



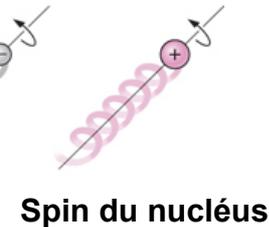
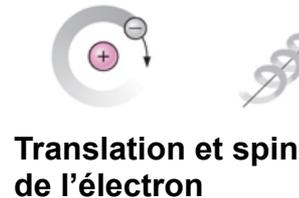
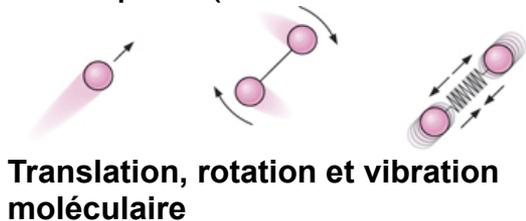
# LA NOTION D'ÉNERGIE

## b) Énergie interne (microscopique)

Énergie liée à la structure et l'activité moléculaire du système, dénotée par  $U$  (et  $u=U/M$ ).  $U$  augmente avec la température

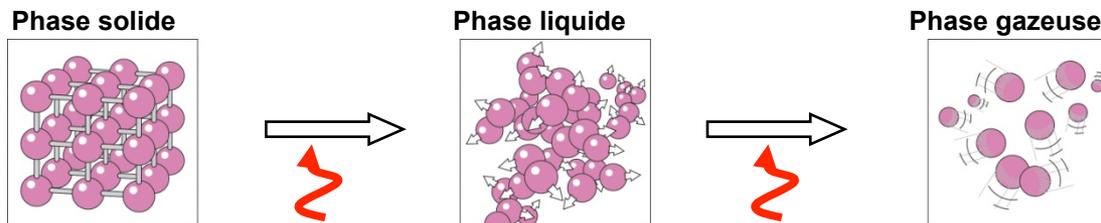
### i) Énergie sensible

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



### 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



# LA NOTION 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.

## c) Notes:

- 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 (W)** et **transfert de chaleur (Q)**



# 2) TRANSFERT DE CHALEUR

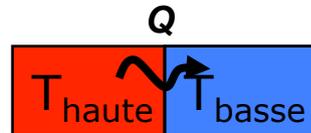
## a) Définition

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 par un fluide en mouvement, peut être **naturelle** ou **forcé**. Terme souvent utilisé pour désigner le transfert de chaleur entre une paroi solide et un fluide en mouvement.



# TRANSFERT DE CHALEUR

## 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:

Taux de transfert de chaleur:  $\dot{Q} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\partial Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}$  [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**

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



# OÙ ON EN EST

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

Heure 6



# 3) TRAVAIL

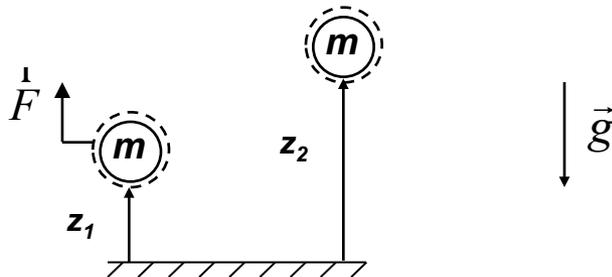
## a) Définition

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't 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)

Exemple: Élévation d'une masse



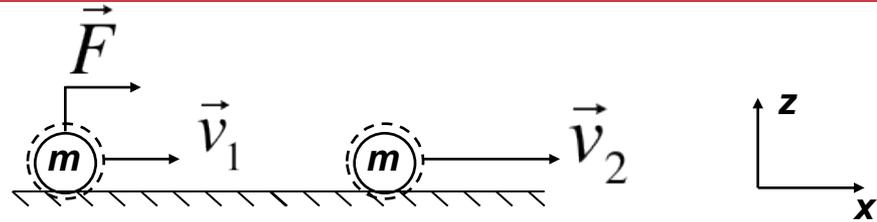
$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{1 \rightarrow 2} F dz = \int_{z_1}^{z_2} mg dz = mg(z_2 - z_1)$$

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



# TRAVAIL

**Exemple :** Accélération d'une masse

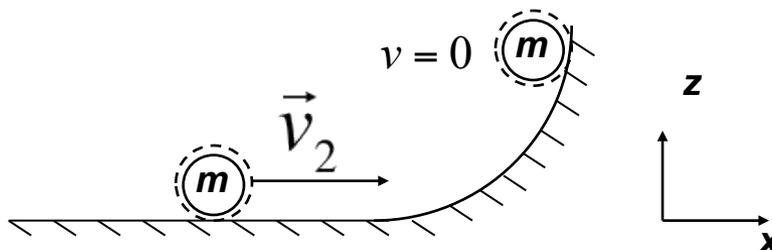


$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{1 \rightarrow 2} F dx = \int_{1 \rightarrow 2} m a dx = \int_{1 \rightarrow 2} m \frac{dv}{dt} dx = \int_{1 \rightarrow 2} m dv \frac{dx}{dt}$$

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

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

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



# TRAVAIL

## b) Types de travail

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

ou

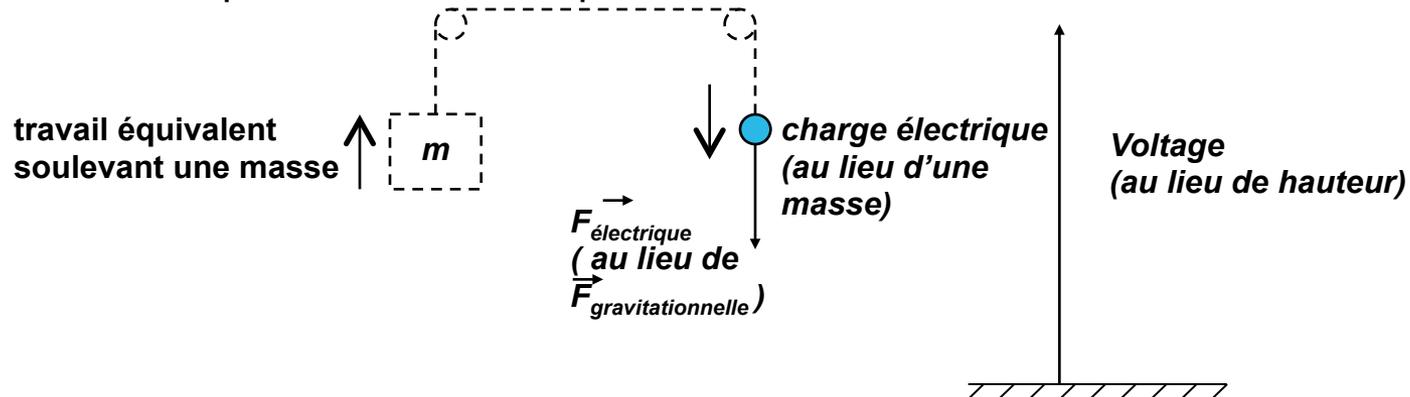
$W = \text{couple } (T = F \cdot r) \times \text{déplacement angulaire } (\theta)$

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:

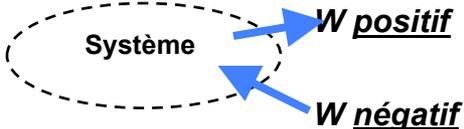


iii) Autres: magnétique (même équivalence mécanique que pour travail électrique)

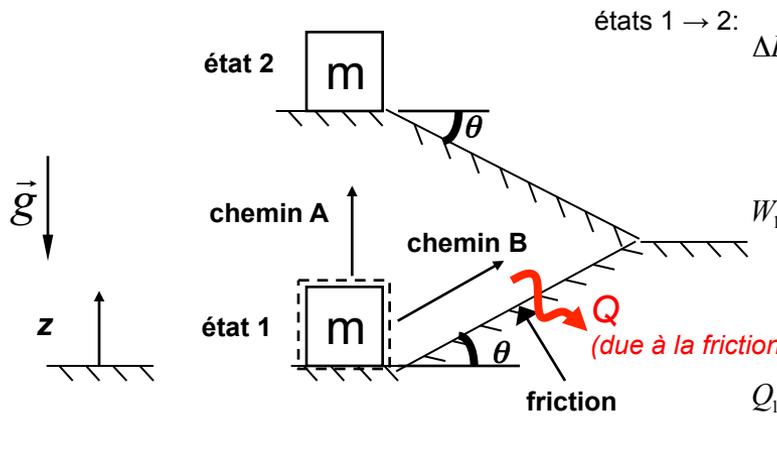
# TRAVAIL

## 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:



états 1 → 2:

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

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

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

- L'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  $\delta Q$ .



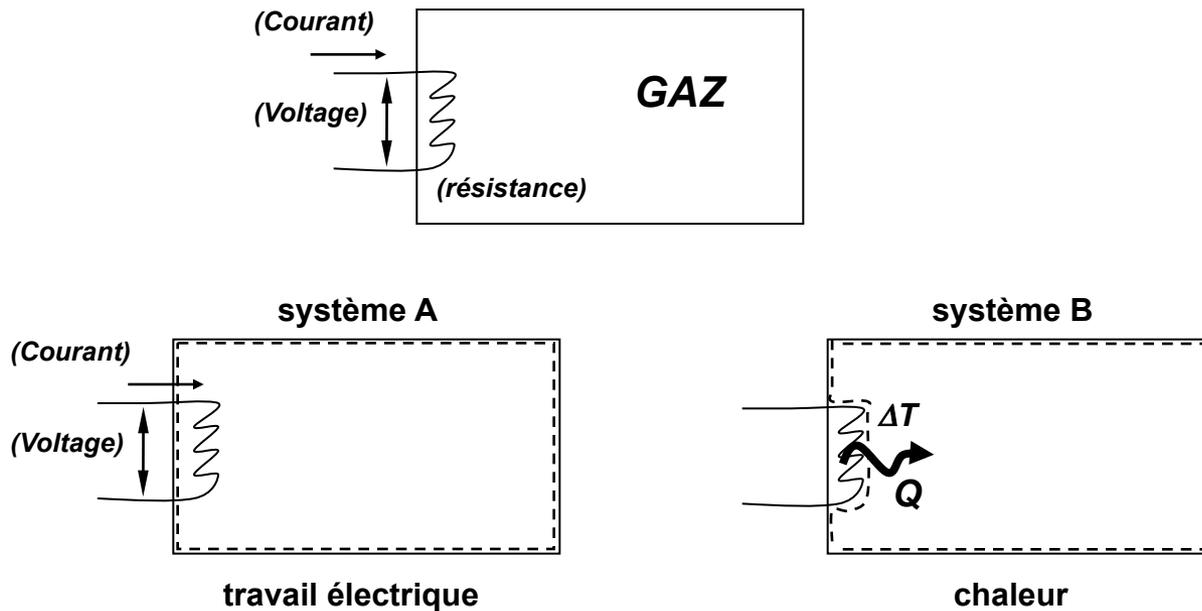
# CHALEUR ET TRAVAIL

## 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.

### Exemple :



# 4) PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

## Perspective historique

- La nature de la chaleur est longtemps restée inconnue
- La **théorie calorique** est avancée vers 1750 (invalidée plus tard)
  - Chaleur sous forme de particules
  - Les "caloriques" sont échangés mais conservés, le transfert est proportionnel à  $\Delta T$
  - Théorie pratique, explique et quantifie beaucoup de phénomènes
  - Populaire (Lavoisier, Laplace, Fourier, etc.)
- La **théorie dynamique** (soutenue par Newton, Boyle, Descartes, etc.) avance que la chaleur est associée au mouvement des particules
  - Difficulté à quantifier les phénomènes de transfert

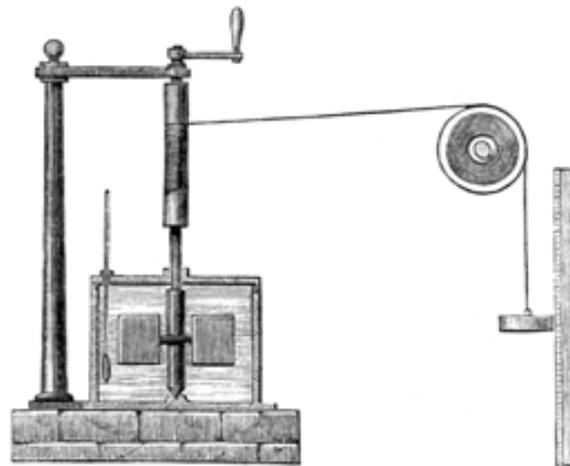


# ÉQUIVALENCE TRAVAIL-CHALEUR

1798, l'expérience de Benjamin Thompson



1840-1850, les expériences de James Prescott Joules



# PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

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.

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

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

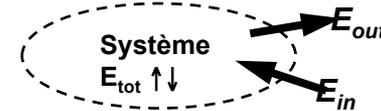


## Autres formes:

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

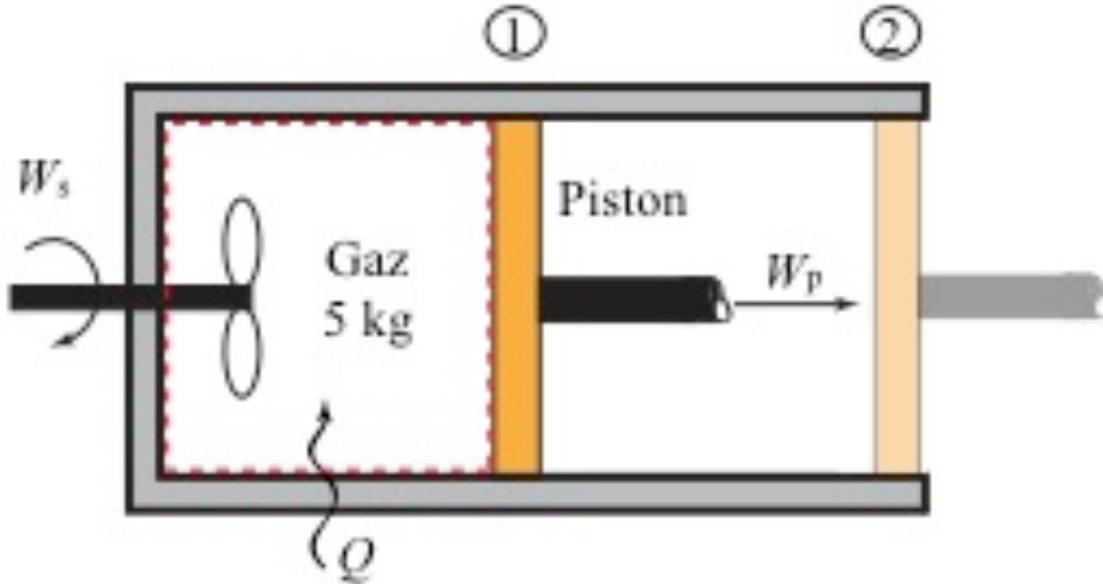


## Notes:

- 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  $W = Q$



# EXEMPLE #2 – TRAVAIL SUR PISTON



$$W_s = 100 \text{ kJ}$$

$$Q = 80 \text{ kJ}$$

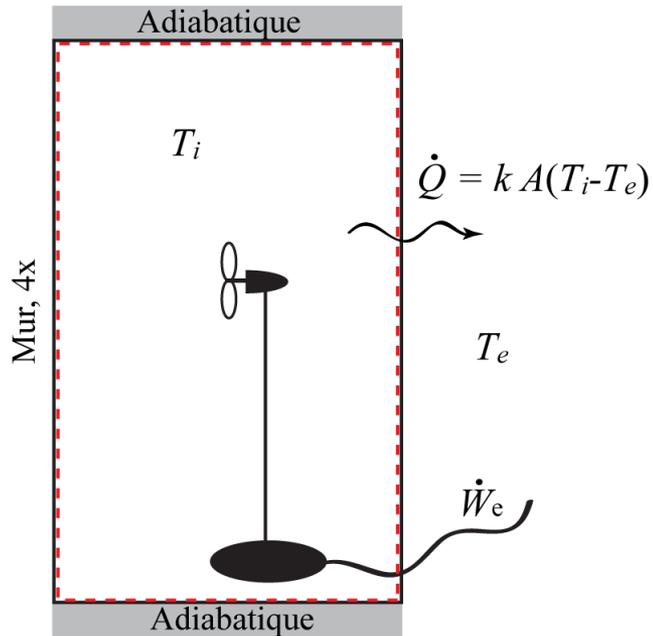
$$u_1 = 2700 \text{ kJ/kg}$$

$$u_2 = 2600 \text{ kJ/kg}$$

Question : trouvez  $W_p$   
Hypothèse : cylindre stationnaire



# EXEMPLE #3 - VENTILATEUR



$$\dot{W}_e = 200 \text{ W}$$
$$k = 6 \text{ W/m}^2\text{°C}$$
$$A = 30 \text{ m}^2 \text{ (total)}$$

État initial :  $T_i = T_e = 25\text{°C}$   
État final : ?

## Hypothèses :

- Aucune pertes de chaleur au travers du plancher et du plafond
- 4 murs adjacents à l'extérieur
- Aucune autre interaction énergétique



# OÙ ON EN EST

I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique

II) Notions de base et définitions

III) **1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes fermés)**

- *La notion d'énergie*

- *Transfert de chaleur*

- *Travail*

- *1<sup>er</sup> 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<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique

VII) Entropie

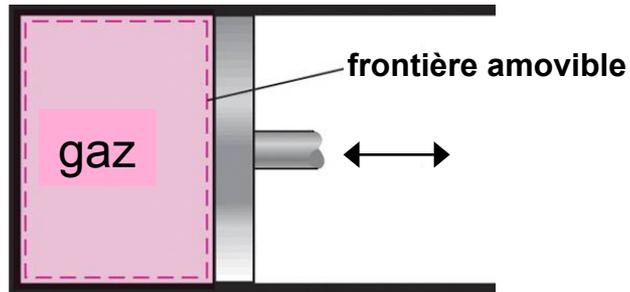
VIII) Cycles thermodynamiques communs

IX) Mélanges non réactifs



# PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

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



Premier principe (différents formats):

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

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

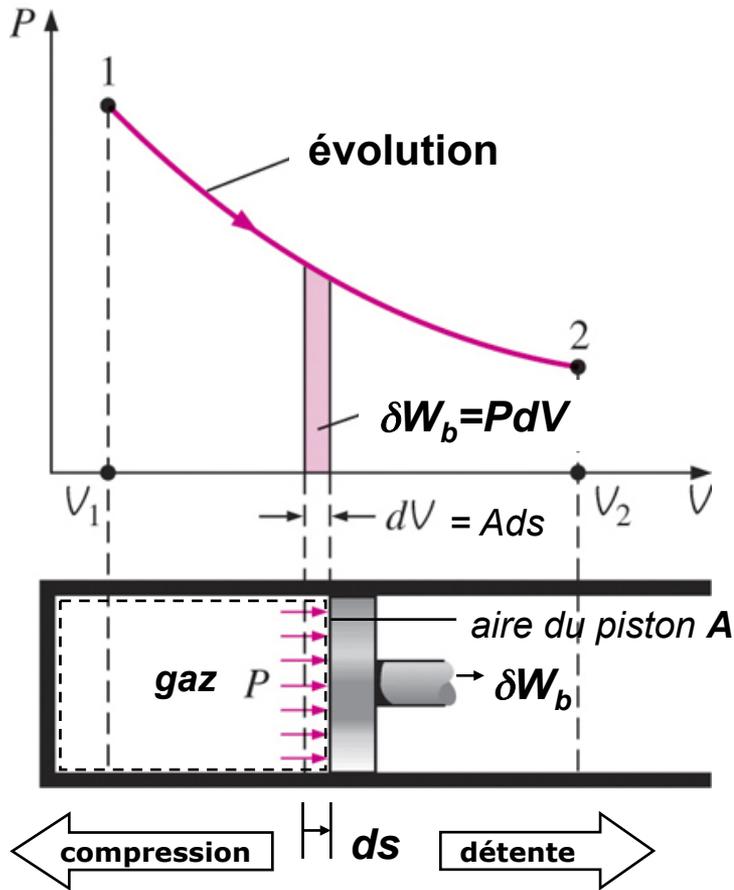
$$\dot{E}_{Tot,sys} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Travail:  $W = W_b + W_{autres}$  → 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'intégrale  $PdV$  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

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

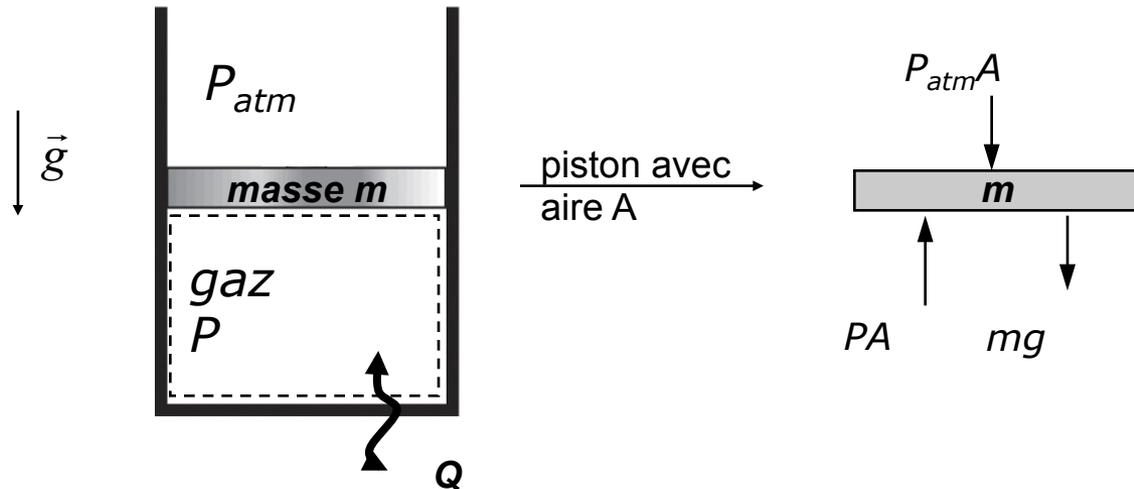
$$W_b = \int_{\text{état 1}}^{\text{état 2}} \delta W_b = \int_{V_1}^{V_2} PdV = \text{aire sous la courbe P - V entre états 1 et 2}$$



# TRAVAIL DE FRONTIÈRES EFFECTUÉ LORS D'UNE DÉTENTE/COMPRESSION

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)



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

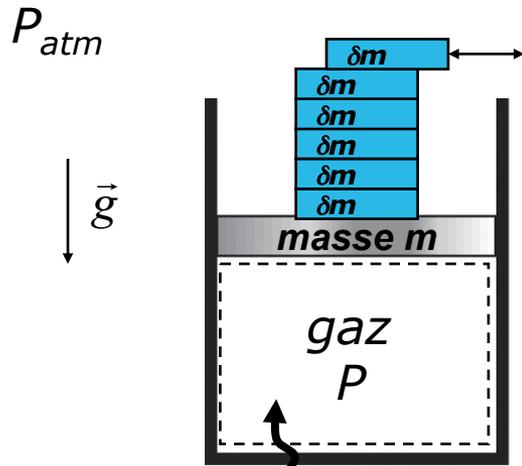
$$P = P_{atm} + \frac{mg}{A} = \text{const.} \equiv P_o$$

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



# TRAVAIL DE FRONTIÈRES EFFECTUÉ LORS D'UNE DÉTENTE/COMPRESSION

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



gaz parfait (Chimie 101):  $PV = NR_u T = \text{const.} \equiv C$

$$P = \frac{C}{V} \rightarrow C = P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2}$$

$Q$  (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  $\delta m$ )

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

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



# TRAVAIL DE FRONTIÈRES EFFECTUÉ LORS D'UNE DÉTENTE/COMPRESSION

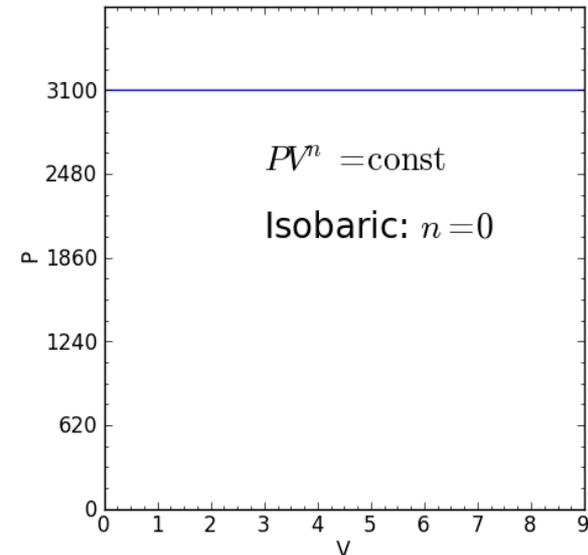
iii) Évolution polytropique ( $PV^n = \text{constant}$ ,  $n \neq 1$ )

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

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

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

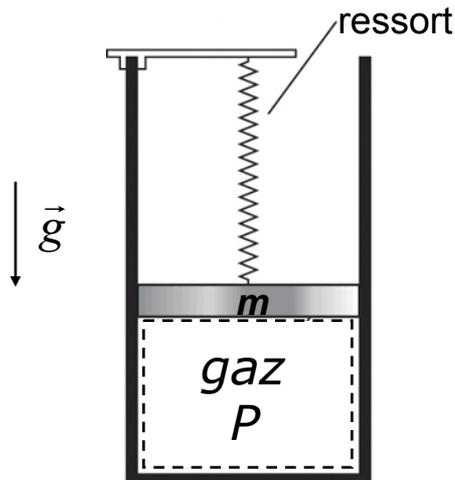
Index polytropique n	Évolution
0	Isobare $PV_0 = C = P$
1	Isotherme $PV = C = nRT$
$\kappa = C_p/C_v$	Adiabatique
$\infty$	Isochore



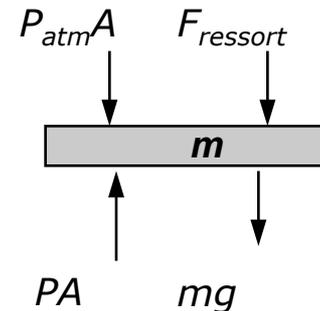
# TRAVAIL DE FRONTIÈRES EFFECTUÉ LORS D'UNE DÉTENTE/COMPRESSION

## iv) Expansion/compression contre un ressort

- Ressort linéaire,  $k$  [N/m]
- Une relation liant la pression et le volume peut être trouvée en incluant la contribution du ressort à l'équilibre des forces sur le piston



Pour trouver  $P=f(V)$ :



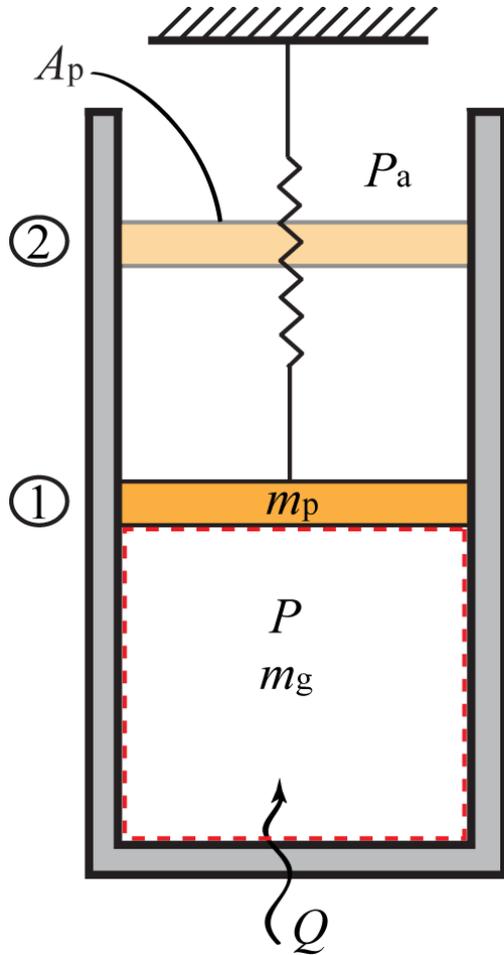
$$\sum F_Z = PA_p - P_a A_p - m_p g - kz$$

$$\sum F_Z = ma = 0$$

$$P = P_a + \frac{m_p g}{A_p} + \frac{kz}{A_p}$$



# EXEMPLE #4 – EXPANSION CONTRE UN RESSORT



$$\begin{aligned}k &= 10^4 \text{ N/m} \\P_a &= 10^5 \text{ Pa} \\A_p &= 7.8 * 10^{-5} \text{ m}^2 \\m_p &= 10 \text{ kg} \\m_g &= 5 * 10^{-4} \text{ kg} \\u_1 &= 214 \text{ kJ/kg} \\u_2 &= 337 \text{ kJ/kg} \\z_1 &= 0 \text{ m (F=0)} \\z_2 &= 5 * 10^{-2} \text{ m}\end{aligned}$$

## Questions :

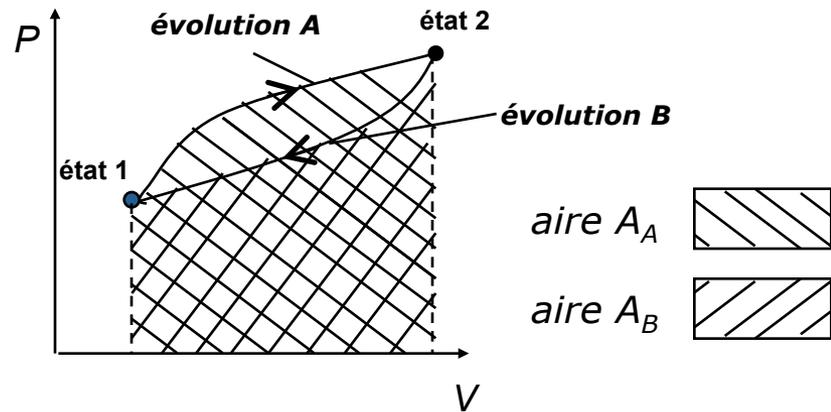
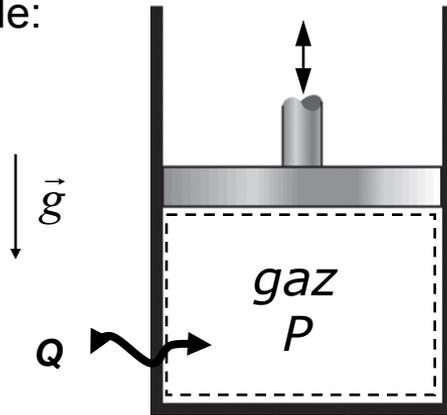
- $P_1$  ?
- $W$  ?
- $Q$  ?



# TRAVAIL NET POUR UN CYCLE

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

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

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

