

## T2 – TRANSFERT ET CONVERSION D'ENERGIE - PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

### Travaux Dirigés

#### Exercice 1 : Paramètres intensifs et extensifs (\*)

Les paramètres suivants sont-ils intensifs ou extensifs ?

Masse, pression, volume, masse volumique, quantité de matière, volume massique, énergie cinétique, concentration.

Paramètres extensifs :  
Masse, volume, quantité de matière, énergie cinétique,  
Paramètres intensifs :  
Pression, volume massique, masse volumique, concentration

#### Exercice 2 : Volume molaire d'un gaz parfait (\*)

Déterminer le volume molaire  $V_m$  occupé par un gaz parfait sous les CNTP (conditions normales de température et de pression :  $P = 1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  et  $T = 0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$ ).

$$\begin{aligned} PV &= nRT \\ \text{d'où : } P \frac{V}{n} &= RT \quad (\text{ou}) \quad P \cdot V_m = RT \\ \text{d'où : } V_m &= \frac{RT}{P} = \frac{8,314 \times 273,15}{1,013 \cdot 10^5} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol} \\ &= 22,4 \text{ L/mol} \end{aligned}$$

#### Exercice 3 : les différentes formes de transferts thermiques (\*)

Associer mode de transfert thermique, support et nature de l'échange :

Mode de transfert	Support matériel	Échange d'énergie
	...	
1 Conduction	a ... inutile	$\alpha$ ... dû à un déplacement (macroscopique) de matière
2 Convection	b ... quelconque	$\beta$ ... grâce à une onde électromagnétique, des photons
3 Rayonnement	c ... fluide	$\gamma$ ... à l'échelle microscopique

#### Exercice 4 : Capacités thermiques à volume constant de gaz parfaits (\*)

L'argon  $Ar$  est un gaz monoatomique d'énergie interne :  $U(T) = \frac{3}{2} nRT$  et le dioxygène  $O_2$  un gaz diatomique, d'énergie interne :  $U(T) = \frac{5}{2} nRT$  (hypothèse gaz parfaits). Pour chaque gaz, donner les expressions de :

- la capacité thermique à volume constant  $C_v$ .
- la capacité thermique molaire à volume constant  $C_{vm}$ .
- la capacité thermique massique à volume constant  $c_v$ .

- d) La valeur de la variation d'énergie interne pour une augmentation de température de 10°C d'un kg de gaz ; comparer à la variation d'altitude nécessaire à une masse de 10 kg pour obtenir une variation d'énergie potentielle équivalente.

Application numérique :  $M(Ar) = 40 \text{ g.mol}^{-1}$ ;  $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ ;  $M(O_2) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$ .

$$\text{Ar: } U(T) = \frac{3}{2} nRT \quad O_2: U(T) = \frac{5}{2} nRT$$

a)  $C_V = \frac{\partial U}{\partial T} = \frac{dU}{dT} = \frac{3}{2} nR \text{ pour Ar}$   
 $C_V = \frac{5}{2} nR \text{ pour } O_2$

b)  $C_{Vm} = \frac{C_V}{m} = \frac{3}{2} R \text{ pour Ar}$   
 $C_{Vm} = \frac{5}{2} R \text{ pour } O_2$

c)  $C_V = \frac{C_V}{m} = \frac{\frac{3}{2} nR}{m} = \frac{3}{2} \frac{R}{M} \text{ pour Ar}$   
 $C_V = \frac{5}{2} \frac{R}{M} \text{ pour } O_2$

d)  $\Delta u = C_V \cdot \Delta T$   
 Pour 1 kg :  
 $\Delta u = C_V \cdot \Delta T$   
 Argon :  
 $\Delta u = \frac{3}{2} \frac{R}{M} \cdot \Delta T$   
 $= \frac{3}{2} \times \frac{8,31}{40 \cdot 10^{-3}} \times 10 = 31,1 \cdot 10^3 \text{ J}$   
 $= \underline{31 \text{ kJ/kg}}$   
 Dioxygène :  
 $\Delta u = \frac{5}{2} \frac{R}{M} \cdot \Delta T$   
 $= \frac{5}{2} \times \frac{8,31}{16 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = \underline{6,5 \text{ kJ/kg}}$ .  
 Avec  
 Argon :  $\Delta E_p = mg \Delta z = \Delta u$ .  
 $\Delta z = \frac{\Delta u}{mg} = \frac{31,1 \cdot 10^3}{10 \times 10} = \underline{31 \text{ m}}$

### Exercice 5 : Capacités thermiques de gaz parfaits (\*)

- 1)  $C_p$  et  $C_v$  désignant les capacités thermiques à pression constante et à volume constant de  $n$  mol de gaz parfait, établir la relation de Mayer :  $C_p - C_v = nR$ .

On définit le coefficient isentropique  $\gamma$  comme le rapport de ces capacités thermiques :  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ .

- 2) Etablir les expressions de  $C_p$  et  $C_v$  en fonction de  $n, R$  et  $\gamma$ .

On donne  $C_{Vm} = \frac{3}{2} R$  pour un gaz parfait monoatomique et  $C_{Vm} = \frac{5}{2} R$  pour un gaz parfait diatomique.

3) Retrouver les valeurs de  $C_{pm}$  et  $\gamma$  pour chacun des gaz.

**Exercice 6 : Pour chauffer de l'eau (\*)**

Quelle énergie thermique apporter à 1 L d'eau liquide pour la chauffer de 0° à 100°C à pression atmosphérique ?

$$\begin{aligned}\Delta U &= m \cdot c \cdot \Delta T \\ &= 1 \times 4180 \times 100 = 418.000 \text{ J}\end{aligned}$$

**Exercice 7 : Equation d'état des gaz parfaits – pneu de voiture (\*)**

On considère un pneumatique de voiture monté sur sa jante. On admettra que le pneu se comporte comme une enveloppe déformable, parfaitement étanche, qui délimite un volume qui reste toujours constant, et que le gaz qu'il contient se comporte comme un gaz parfait.

La pression dans ce pneumatique, mesurée à  $\theta_A = 20^\circ\text{C}$ , est  $p_A = 3,0 \text{ bar}$ ,  $V_A = 35 \text{ L}$ .

- 1) Déterminer le nombre de moles de gaz contenues dans le pneu.
- 2) Quelle sera la pression dans le pneu pour une température du gaz à l'intérieur du pneu de  $\theta_B = 10^\circ\text{C}$  ? de  $\theta_C = 40^\circ\text{C}$  ?
- 3) Quatre pneumatiques identiques, dont la pression mesurée est  $p_A$  à  $T_A$ , sont montés sur une voiture de tourisme de masse totale  $m = 1,440 \text{ t}$  répartie de manière équilibrée sur les deux essieux. Déterminer la surface de contact entre le pneu et le sol (suppose parfaitement dur et horizontal). On prendra  $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$ .

*Aide :* La pression est une force surfacique ( $p = \frac{\text{force}}{\text{surface}}$ ) ; le sol exerce sur les pneus 4 forces qui équilibrent le poids du véhicule.

$$\Theta_A = 20^\circ\text{C} \quad P_A = 3,0 \text{ bar} \quad V_A = 35 \text{ L}$$

$$1) PV = nRT$$

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{3,60 \times 35 \cdot 10^{-3}}{8,314 \times (273+20)} = \underline{\underline{4,4 \text{ mol}}}$$

$$2) PV = nRT$$

$$V = \text{cte} \quad ; \quad n = \text{cte} \quad ; \quad R = \text{cte}$$

$$P_A V_A = m_A R T_A \quad \text{ou} \quad P_A V = m R T_A \quad (1)$$

$$P_B V_B = m_B R T_B \quad \text{ou} \quad P_B V = m R T_B \quad (2)$$

$$P_C V_C = m_C R T_C \quad \text{ou} \quad P_C V = m R T_C \quad (3)$$

$$\frac{(2)}{(1)} \Rightarrow \frac{P_B}{P_A} = \frac{T_B}{T_A} \Rightarrow P_B = \frac{T_B}{T_A} \cdot P_A$$

$$P_B = \frac{273+10}{273+20} \times 3,0 = \underline{\underline{3,2 \text{ bar}}}$$

De même :

$$P_C = \frac{273+40}{273+20} \times 3,0 = \underline{\underline{3,2 \text{ bar}}}$$

3) Équilibre mécanique :

$$P_A = \frac{mg/4}{S} = \frac{mg}{4S}$$

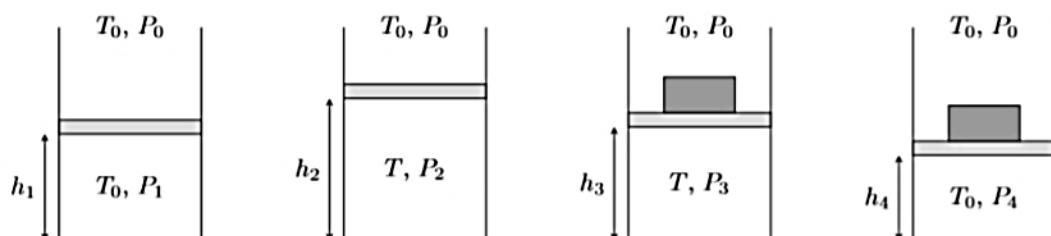
$$\begin{aligned} \text{d'où : } S &= \frac{mg}{4P_A} = \frac{1,44 \cdot 10^3 \times 10}{4 \times 3,60} \\ &= 12 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \\ &= 12 \text{ dm}^2 \\ &= 120 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

### Exercice 8 : Gaz parfait dans une enceinte (\*)

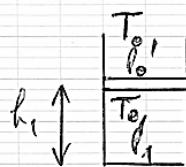
Une quantité de matière  $n$  de gaz parfait est enfermée dans une enceinte de surface de base  $S$ . Cette enceinte est fermée par un piston de masse  $m$ , à même de coulisser sans frottement, et permet les transferts thermiques, si bien que lorsqu'on attend suffisamment longtemps le gaz contenu dans l'enceinte est en équilibre thermique avec l'extérieur. Le milieu extérieur se trouve à température et pression constantes  $T_0$  et  $P_0$ . On fait subir au gaz la série de transformations suivante.

- ▷ Initialement, dans l'état (1), le système est au repos depuis suffisamment longtemps pour avoir atteint l'équilibre thermique et mécanique;
- ▷ Le gaz est chauffé jusqu'à ce qu'il atteigne la température  $T > T_0$ , plaçant le système dans l'état (2);
- ▷ Une masse supplémentaire  $M$  est brusquement placée par dessus le piston : avant tout transfert thermique, le système est dans l'état (3);
- ▷ Enfin, l'équilibre thermique est atteint, le système est alors dans l'état (4).

Déterminer les quatre positions du piston  $h_1$  à  $h_4$ .



Etat 1



Équilibre du piston :

$$P_1 S = P_0 S + mg \Rightarrow P_1 = P_0 + \frac{mg}{S}$$

Or :

$$P_1 V_1 = nRT_0 \quad \text{avec} \quad V_1 = h_1 S$$

$$P_1 h_1 S = nRT_0$$

$$(P_0 + \frac{mg}{S}) h_1 S = nRT_0$$

$$h_1 (P_0 S + mg) = nRT_0$$

$$h_1 = \frac{nRT_0}{P_0 S + mg}$$

Etat 2

Même raisonnement, mais avec  $T$  au lieu de  $T_0$

$$h_2 = \frac{nRT}{P_0 S + mg}$$

Etat 3

Même raisonnement, mais la masse du piston passe de  $m$  à  $(m+M)$

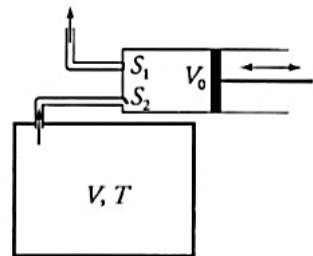
$$h_3 = \frac{nRT}{P_0 S + (m+M)g}$$

Etat 4

$$h_4 = \frac{nRT_0}{P_0 S + (m+M)g}$$

### Exercice 9 : Pompe à vide (\*\*)

Pour faire le vide dans une enceinte, contenant de l'air et de volume  $V$ , on utilise une pompe. Elle est composée d'un cylindre à l'intérieur duquel se déplace, sans frottement, un piston. Le volume maximum d'air admissible dans le corps de pompe est  $V_0$ , lorsque le piston est tiré complètement vers la droite. Lorsqu'il est poussé complètement à gauche, le piston peut atteindre le fond du cylindre. Deux soupapes,  $S_1$  et  $S_2$ , permettent l'admission de l'air venant de l'enceinte et son refoulement vers l'atmosphère extérieure dont la pression est  $P_0$ . Un moteur électrique déplace le piston qui fait un aller et un retour quand le moteur a fait un tour. On assimilera l'air à un gaz parfait dont la température  $T$  reste constante lors du fonctionnement de la pompe.



Au départ, la pression dans l'enceinte est  $P_0 = 1,000 \times 10^5 \text{ Pa}$ . On néglige le volume du tuyau reliant la pompe à l'enceinte.

- On étudie le premier aller-retour du piston. Au départ, la pression dans l'enceinte est  $P_0$ , le piston est poussé à gauche. Puis,  $S_2$  étant ouverte et  $S_1$  fermée, il est tiré complètement vers la droite.

Lors du retour du piston,  $S_1$  est ouverte et  $S_2$  est fermée, l'air contenu dans le cylindre est refoulé vers l'extérieur.

Déterminer la pression  $P_1$  à la fin de cette opération.

- En reprenant le raisonnement précédent, déterminer la pression  $P_2$ , dans l'enceinte, à la fin du deuxième aller du piston.
- En déduire la pression  $P_N$  à l'intérieur de l'enceinte au bout de  $N$  allers-retours.
- La fréquence de rotation du moteur est de  $300 \text{ tr.min}^{-1}$ . Déterminer le temps  $t$  pour obtenir une pression de  $0,001 \times 10^5 \text{ Pa}$ . On donne  $V = 10,0 \text{ L}$  et  $V_0 = 50,0 \text{ cm}^3$ .

1.  $\text{EI} :$   $\text{EF} :$

Système : le gaz de l'enceinte (système ouvert)

$P_0, m_0$	$P_1, m_1$
$V, T$	$V, T$

On ne nous parle pas de variations de température

$\Rightarrow T_f = T_i$

$EI : P_0 V = m_0 RT$

$EF : P_1 V = m_1 RT \quad (1)$

Or :  $m_1 = m_0 - m_2 \quad (2)$

avec  $m_2$  quantité de matière emmagasinée dans le volume  $V_0$  de la pompe

$P_0 V_0 = m_2 RT$  en supposant  $P = P_0$

$\Rightarrow m_2 = \frac{P_0 V_0}{RT} \quad (3)$  dans la phase pendant cette

(2) et (1)  $\Rightarrow P_1 V = (m_0 - \frac{P_0 V_0}{RT}) RT$

(3)  $\Rightarrow P_1 V = (m_0 - \frac{P_0 V_0}{RT}) RT$

$$P_1 V = m_0 RT - P_0 V_0$$

Avec

$$m_0 = \frac{P_0 V}{RT}$$

On obtient :

$$P_1 V = P_0 V - P_0 V_0$$

$$P_1 = P_0 \frac{V - V_0}{V}$$

$$2. \quad P_2 = P_1 \frac{V - V_0}{V} = P_0 \left( \frac{V - V_0}{V} \right)^2$$

$$3. \quad P_N = P_0 \left( \frac{V - V_0}{V} \right)^N$$

4. On veut

$$P_N = 0,001 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{Avec } P_0 = 1,000 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

D'où :

$$\frac{P_N}{P_0} = 10^{-3} = \left( \frac{V - V_0}{V} \right)^N$$

$$\Rightarrow \ln \left( \frac{P_N}{P_0} \right) = N \ln \left( \frac{V - V_0}{V} \right)$$

$$N = \frac{\ln \left( \frac{P_N}{P_0} \right)}{\ln \left( \frac{V - V_0}{V} \right)} = \frac{\ln 10^{-3}}{\ln \left( \frac{10 - 0,05}{10} \right)} = 1378.$$

$$\begin{aligned} V &= 10,0 \text{ L} \\ V_0 &= 50,0 \text{ cm}^3 \\ &= 0,05 \text{ dm}^3 \\ &= 0,05 \text{ L} \end{aligned}$$

Détermination de  $t$ :

$$\begin{array}{rcl} N(\text{tr}) & t(\text{min}) \\ 300 & 1 \\ 1378 & \frac{1378}{300} = 4,59 \text{ min} \\ & = 275 \text{ s} \end{array}$$

### Exercice 10 : Equilibre entre 2 récipients (\*)

Une enceinte parfaitement calorifugée contient deux compartiments séparés par une paroi mobile initialement maintenue par des cales. La paroi mobile de masse négligeable laisse parfaitement l'équilibre thermique s'établir entre les deux compartiments. Le premier compartiment noté A de volume  $V_A = 1,00 \text{ L}$  contient 0,30 mol d'un gaz parfait de température  $T_A = 293 \text{ K}$ . Le second compartiment noté B de volume  $V_B = 2,00 \text{ L}$  contient 0,10 mol d'un gaz parfait de température  $T_B = 293 \text{ K}$ . On donne  $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$

1. Calculer les pressions initiales dans les 2 compartiments quand la paroi est bloquée.
2. La paroi mobile est libérée. Calculer les volumes, les températures et les pressions dans l'état d'équilibre final, pour les deux compartiments.
3. Reprendre l'étude dans le cas où  $T_A = 293 \text{ K}$  et  $T_B = 343 \text{ K}$ .

EF :

$V_A$	$V_B$
$T_A$	$T_B$
$m_A$	$m_B$

EF :

$V$	$T$
$m$	

$$1. P_A V_A = n_A R T_A$$

$$P_A = \frac{m_A R T_A}{V_A}$$

$$P_A = \frac{0,30 \times 8,31 \times 293}{1 \cdot 10^{-3}}$$

$$P_A = 7,3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_A = 7,3 \text{ bar}$$

De même :

$$P_B = \frac{m_B R T_B}{V_B}$$

$$P_B = \frac{0,10 \times 8,31 \times 293}{2 \cdot 10^{-3}}$$

$$P_B = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_B = 1,2 \text{ bar}$$

$$2. V = V_A + V_B = 3,00 \text{ L}$$

(grandeur extensive)

$$T = T_A = T_B$$

(grandeur intensive)

$$m = m_A + m_B = 0,40 \text{ mol}$$

(grandeur extensive)

$$PV = mRT$$

$$P = \frac{mRT}{V}$$

$$P = \frac{0,40 \times 8,31 \times 293}{3 \cdot 10^{-3}}$$

$$P = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$P = 3,2 \text{ bar}$$

2. (a) avec les mesures partielles

$$P_{A,f} = \frac{V_A}{V} P_A = \frac{1}{3} \times P_A = 2,4 \text{ bar}$$

$$P_{B,f} = \frac{V_B}{V} P_B = \frac{2}{3} \times P_B = \frac{2}{3} \times 1,2 = 0,8 \text{ bar}$$

$$P_f = P_{A,f} + P_{B,f} = 3,2 \text{ bar}$$

3. Comment évolue le système si  $T_A = 293\text{ K}$

Etat initial :

$$P_{A,i} V_A = m_A R T_A \quad (1)$$

$$P_{B,i} V_B = m_B R T_B \quad (2)$$

(Inconnues  $P, T, P_{Af}, P_{Bf}$ )

Etat final

$$P_{Af} V = m_A R T \quad (3)$$

( $P_{Af}$  pression partielle)

$$P_{Bf} V = m_B R T \quad (4)$$

( $P_{Bf}$  pression partielle)

$$PV = nRT$$

(pression totale)

$\rightarrow P$  et  $T$  inconnues à l'état final

D'après (1) et (3) :

$$\frac{P_{Af} V}{P_{A,i} V_A} = \frac{m_A R T}{m_A R T_A} \Rightarrow P_{Af} = \frac{T}{T_A} \times \frac{V_A}{V} \times P_{A,i}$$

D'après (2) et (4) :

$$\frac{P_{Bf} V}{P_{B,i} V_B} = \frac{m_B R T}{m_B R T_B} \Rightarrow P_{Bf} = \frac{T}{T_B} \times \frac{V_B}{V} \times P_{B,i}$$

Or :

$$P_{Af} + P_{Bf} = P \quad (P = \sum P_{partielles})$$

$$\boxed{\frac{T}{T_A} \frac{V_A}{V} P_{A,i} + \frac{T}{T_B} \frac{V_B}{V} P_{B,i} = P}$$

$\Rightarrow 2$  inconnues  $P$  et  $T$ .

Utilisation de l'énergie interne : l'énergie interne ne dépend que de la température  
 $U = k m T$  avec  $k$  constante

( $k = \frac{3}{2} R$  n° gaz monoatomique)

⑤

$$EF : U_A = k m_A T_A$$

$$U_B = k m_B T_B$$

$$EF : U = k m T$$

Or il n'y a pas de variation d'énergie interne entre EI et EF car :

Voir premier principe.  $\leftarrow \begin{cases} Q = 0 & (\text{parois calorifugées}) \\ W = 0 \end{cases}$

$$\text{D'où : } U_A + U_B = U \\ k m_A T_A + k m_B T_B = k m T$$

$$T = \frac{m_A}{m} T_A + \frac{m_B}{m} T_B$$

$$\boxed{T = \frac{m_A}{m_A + m_B} T_A + \frac{m_B}{m_A + m_B} T_B}$$

A.N :

$$T = \frac{0,30}{0,40} \times 293 + \frac{0,10}{0,40} \times 343$$

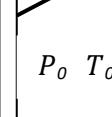
$$\underline{T = 305,5 \text{ K}}$$

$$P = \frac{305,5}{293} \times \frac{1}{3} \times 7,3 + \frac{305,5}{343} \times \frac{2}{3} \times 1,2$$

$$\underline{P = 3,25 \text{ bars}}$$

### Exercice 11 : Transformation brutale ou quasi-statique (\*)

Un gaz parfait ( $n = 0,01$  mole) est enfermé dans un cylindre à parois diathermes (permettant au système d'être en équilibre thermique avec le milieu extérieur), fermé par un piston mobile sans frottements. Le milieu extérieur est à la pression  $P_0 = 1$  bar et à la température  $T_0 = 300 K$ .

$n, P_1$	
$P_0, T_0$	

- 1) Calculer le travail reçu par le système du milieu extérieur lorsqu'on retire la goupille qui immobilise le piston, dans les différents cas suivants : a)  $P_1 = 10 P_0$       b)  $P_1 = 0,1 P_0$
- 2) Idem pour une transformation quasi-statique mécaniquement réversible, au cours de laquelle un opérateur accompagnerait le déplacement du piston de façon à ce qu'il soit quasi-statique.

On précisera soigneusement les transformations subies par le gaz.

Rép. : 1) a)  $W = -22,5 J$  et b)  $W = 225 J$       2)  $W = -57 J$

Exercice 11

$$1) a) W = - \int_{V_i}^{V_f} P_{ext} \cdot dV = - P_{ext} \int_{V_i}^{V_f} dV \quad | * P_{ext} \neq P.$$

$$EI: \quad = - P_0 \cdot [V]_{V_i}^{V_f} = - P_0 (V_f - V_i)$$

$$\left[ \begin{array}{c|c} m & P_0 \\ \hline V_i & T_i \\ \hline V_f & T_f \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} P_0 T_0 \\ \hline \end{array} \right] = - P_0 \left( \frac{nRT_f}{P_f} - \frac{nRT_i}{P_i} \right) \quad | * \text{Transformation monobare: } P_{ext} = P_0$$

$$EF: \quad = - P_0 \left( \frac{nRT_0}{P_0} - \frac{nRT_0}{10P_0} \right) \quad | * \text{Monotherme: } T_0 = \text{cte} \quad (+ \text{équilibre thermique}).$$

$$\left[ \begin{array}{c|c} m & P_0 \\ \hline V_f & T_f \\ \hline \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} P_0 T_0 \\ \hline \end{array} \right] = - nRT_0 \left( 1 - \frac{1}{10} \right) \quad | \Rightarrow T_i = T_f = T_0 \\ = - 0,01 \times 8,31 \times 300 \times \frac{9}{10} = - 225 \text{ J} < 0 \quad | \text{ le } \Sigma \text{ fournit du Travail}$$

$$b) W = - nRT_0 (1 - 10) \quad | \text{ le } \Sigma \text{ reçoit du Travail de l'extérieur}$$

2) Mécanisme réversible  $\Rightarrow P_{ext} = P$ .  $\oplus$

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P \cdot dV = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT_0}{V} \cdot dV \quad | \text{Isotherme} \quad T = T_0$$

$$= - nRT_0 \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

$$= nRT_0 \ln \left( \frac{1}{10} \right)$$

$$= - 0,01 \times 8,31 \times 300 \times \ln 10 \\ = - 57 \text{ J}$$

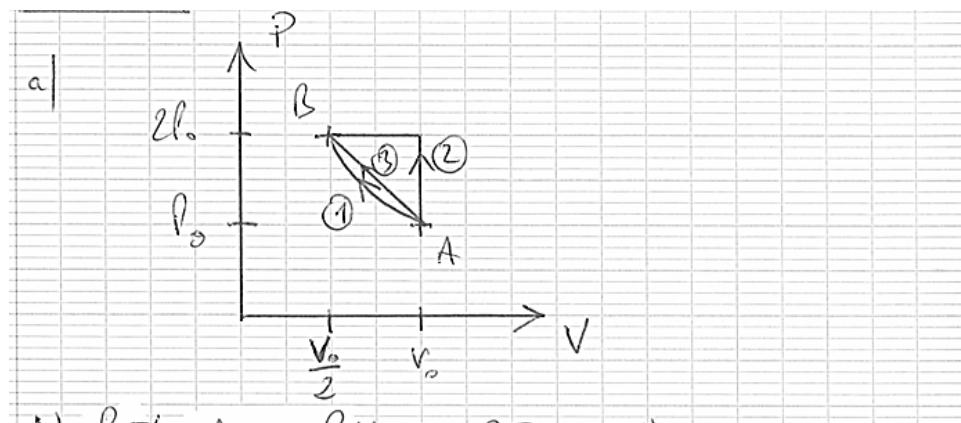
$1) a) W = - \int_{V_i}^{V_f} P_{ext} \cdot dV = - P_{ext} \int_{V_i}^{V_f} dV \quad   * P_{ext} \neq P.$ $EI: \quad = - P_0 \cdot [V]_{V_i}^{V_f} = - P_0 (V_f - V_i)$ $\left[ \begin{array}{c c} m & P_0 \\ \hline V_i & T_i \\ \hline V_f & T_f \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} P_0 T_0 \\ \hline \end{array} \right] = - P_0 \left( \frac{nRT_f}{P_f} - \frac{nRT_i}{P_i} \right) \quad   * \text{Transformation monobare: } P_{ext} = P_0$ $EF: \quad = - P_0 \left( \frac{nRT_0}{P_0} - \frac{nRT_0}{10P_0} \right) \quad   * \text{Monotherme: } T_0 = \text{cte} \quad (+ \text{équilibre thermique}).$ $\left[ \begin{array}{c c} m & P_0 \\ \hline V_f & T_f \\ \hline \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} P_0 T_0 \\ \hline \end{array} \right] = - nRT_0 \left( 1 - \frac{1}{10} \right) \quad   \Rightarrow T_i = T_f = T_0 \\ = - 0,01 \times 8,31 \times 300 \times \frac{9}{10} = - 225 \text{ J} < 0 \quad   \text{ le } \Sigma \text{ fournit du Travail}$ $b) W = - nRT_0 (1 - 10) \quad   \text{ le } \Sigma \text{ reçoit du Travail de l'extérieur}$ <p>2) Mécanisme réversible <math>\Rightarrow P_{ext} = P</math>. <math>\oplus</math></p> $W = - \int_{V_i}^{V_f} P \cdot dV = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT_0}{V} \cdot dV \quad   \text{Isotherme} \quad T = T_0$ $= - nRT_0 \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$ $= nRT_0 \ln \left( \frac{1}{10} \right)$ $= - 0,01 \times 8,31 \times 300 \times \ln 10 \\ = - 57 \text{ J}$
---

### Exercice 12 : Travail des forces pressantes pour différentes transformations (\*\*)

Deux moles de dioxygène, considéré comme un gaz parfait, passent d'un état A( $p_0, V_0, T_0$ ) à un état B( $2p_0, V_0/2, T_B$ ) selon 3 chemins distincts, **tous mécaniquement réversibles**.

- chemin (1) : transformation isotherme
  - chemin (2) : transformation isochore puis transformation isobare
  - chemin (3) : transformation telle que la pression  $P$  est fonction affine du volume  $V$ .
- Tracer l'allure de chaque transformation dans le diagramme de Watt.
  - Déterminer  $T_B$ .
  - Calculer  $W$  reçu par le gaz lors des transformations réversibles suivant les trois chemins ci-dessus.
  - Que valent les variations d'énergie interne sur chacun des chemins sachant que  $C_{vm} = \frac{5}{2}R$  pour le dioxygène ?

Application numérique :  $T_0 = 300 K$ ;  $R = 8,31 J.K^{-1}.mol^{-1}$ .



b) Point A :  $\frac{P_0 V_0}{n R T_0} = 1$  (1)

Point B :  $\frac{2P_0 \frac{V_0}{2}}{n R T_B} = 1$  (2)

$$\frac{(2)}{(1)} : \frac{\frac{P_0 V_0}{2}}{\frac{P_0 V_0}{n R T_0}} = \frac{n R T_B}{n R T_0} = 1 \Rightarrow T_B = T_0$$

c) (1)  $W = - \int_{V_0}^{\frac{V_0}{2}} P_{ext} \cdot dV = - \int_{V_0}^{\frac{V_0}{2}} \frac{P_0}{V} \cdot dV$  car Transfo. réversible.

$$\begin{aligned} W &= - \int_{V_0}^{\frac{V_0}{2}} \frac{m R T_0}{V} \ln \frac{V_0}{V} dV = - m R T_0 \left[ \ln V \right]_{V_0}^{\frac{V_0}{2}} \\ &= - m R T_0 \ln \left( \frac{1}{2} \right) = \frac{m R T_0 \ln 2}{1} \\ &= 2 \times 8,31 \times 300 \times \ln 2 \\ &= 37 kJ \end{aligned}$$

Avec sous la courbe.

$$\begin{aligned}
 (2) \quad W &= W_{\text{isochore}} + W_{\text{isobare}} \\
 &= 0 - \int_{V_0}^{\frac{V_0}{2}} P_{\text{ext}} \cdot dV = -P_{\text{ext}} \int_{V_0}^{\frac{V_0}{2}} dV \\
 &= -2P_0 \left[ V \right]_{V_0}^{\frac{V_0}{2}} = \frac{P_0 V_0}{2}
 \end{aligned}$$

Avec sous le curseur !

$$\begin{aligned}
 W &= P_0 V_0 = nRT_0 = 2 \times 8,31 \times 300 \\
 &= 5,0 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$(3) \quad W = - \int_{V_0}^{\frac{V_0}{2}} P_{\text{ext}} \cdot dV$$

(d) Dans les 3 cas:

$$\begin{aligned}
 \Delta U &= nC_m \Delta T \\
 &= 0 \\
 \text{car } T_f &= T_i
 \end{aligned}$$

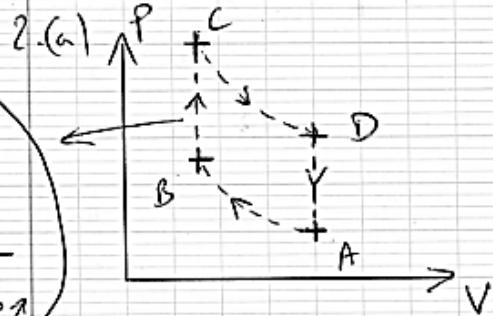
$$\begin{aligned}
 W &= + \left| \text{Aire sous le courbe} \right| \\
 &= \text{Aire du trapèze.} \\
 &= P_0 \frac{V_0}{2} + (2P_0 - P_0) \times \frac{V_0}{2} \times \frac{1}{2} \\
 &= P_0 V_0 \times \frac{3}{4} = \underline{0,75 P_0 V_0} = 0,75 \times nRT_0 \\
 &= 0,75 \times 2 \times 8,31 \times 300 = \underline{3,7 \text{ kJ}}
 \end{aligned}$$

### Exercice 13 : Etude de cycles (\*\*)

On considère une mole de gaz parfait diatomique ( $C_{V_m} = \frac{5}{2}R$ ). On donne la constante des gaz parfaits :  $R = 8,31\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

1. Quelle est l'allure la courbe d'une évolution isotherme de ce gaz en diagramme de Clapeyron (P,V) ? Justifier votre réponse.
2. Le gaz effectue le cycle de Stirling ABCDA :
  - compression isotherme à  $T_1$  de A à B
  - chauffage isochore de B à C
  - détente isotherme de C à D à  $T_2$
  - refroidissement isochore de D à A
  - (a) Tracer l'allure du cycle en diagramme de Clapeyron.
  - (b) Identifier si le cycle est moteur ou récepteur.
  - (c) Calculer le travail des forces de pression pour chacune des étapes du cycles.
  - (d) En déduire le travail total reçu par le système. Quel est son signe? Commenter.
3. Le gaz effectue le cycle d'Ericsson ABCDA :
  - compression isotherme à  $T_1$  de A à B
  - refroidissement isobare de B à C
  - détente isotherme de C à D à  $T_2$
  - chauffage isochore de D à A
  - (a) Tracer l'allure du cycle en diagramme de Clapeyron.
  - (b) Identifier si le cycle est moteur ou récepteur.
  - (c) Calculer le travail des forces de pression pour chacune des étapes du cycles.
  - (d) En déduire le travail total reçu par le système. Quel est son signe? Commenter.

1.  $PV = nRT = RT$   
 Isotherme  $\Leftrightarrow T = \text{cte}$   
 $P = \frac{RT}{V}$  de la forme  $y = \frac{a}{x} \Rightarrow$  Hyperbole



Remarque:  $T_2 > T_1$

- BC = chauffage isochore  
 $PV = nRT$   
 Si  $T_1$ , alors  $P_1$

(b) Sans horne  $\Rightarrow$  Cycle moteur.

(c)  $W_{AB} = - \int_{V_A}^{V_B} P_{\text{ext}} \cdot dV = - \int_{V_A}^{V_B} P \cdot dV$  avec  $P = \frac{RT}{V}$   
 $W_{AB} = -RT_1 \int_{V_A}^{V_B} \frac{dV}{V} = -RT_1 \left[ \ln V \right]_{V_A}^{V_B}$

$W_{AB} = -RT_1 \ln \frac{V_B}{V_A} = RT_1 \ln \frac{V_A}{V_B}$

- $W_{AB} > 0$   
 Travail effectué
- $T_2 > T_1$   
 réellement
- $W_{CD} < 0$   
 Travail eff.  
 réel!

De même:

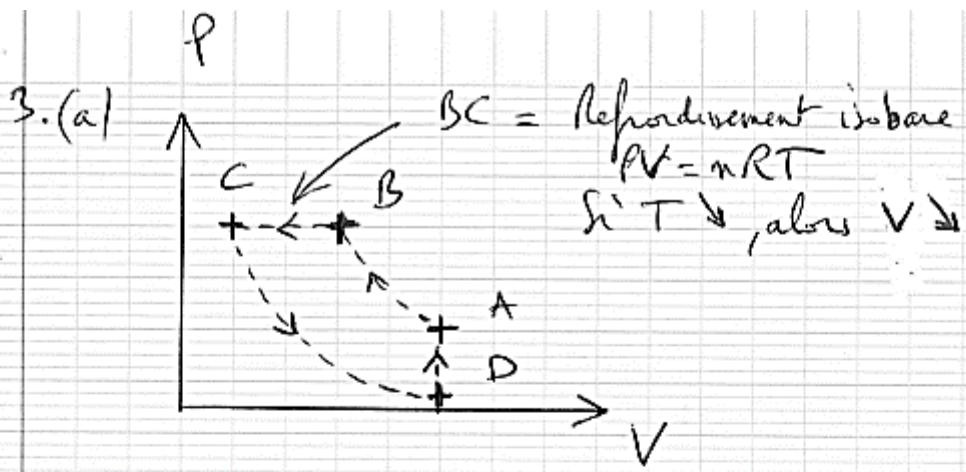
$W_{CD} = -RT_2 \ln \frac{V_D}{V_C} = -RT_2 \ln \frac{V_A}{V_B}$

$W_{BC} = 0$  car  $\Delta V = 0$   
 $W_{DA} = 0$  car  $\Delta V = 0$

(d)  $\sum W = RT_1 \ln \frac{V_A}{V_B} - RT_2 \ln \frac{V_A}{V_B}$

$= R(T_1 - T_2) \ln \frac{V_A}{V_B} < 0$

Le travail est globalement dédié à l'expansion.  
 Il s'agit bien d'un moteur!



(b) Sans direct  $\Rightarrow$  Cycle récepteur.

$$(c) W_{AB} = RT_1 \ln \frac{V_A}{V_B} \quad (\text{compression isotherme})$$

$$W_{BC} = - \int P_{\text{ext}} \cdot dV = - \int_{V_B}^{V_C} P_B \cdot dV \\ = - P_B (V_C - V_B) = P_B (V_B - V_C)$$

$$W_{CD} = - RT_2 \ln \frac{V_D}{V_C} \quad (\text{détente isotherme})$$

$$W_{DA} = 0 \quad \text{car} \quad dV = 0$$

$$(d) \sum W = RT_1 \ln \left( \frac{V_A}{V_B} \right) - RT_2 \ln \left( \frac{V_D}{V_C} \right)$$

$$\sum W = RT_1 \ln \left( \frac{V_A}{V_B} \right) + P_B (V_B - V_C) \\ - RT_2 \ln \left( \frac{V_A}{V_B} \right) - RT_2 \ln \left( \frac{V_B}{V_C} \right) + P_B (V_B - V_C)$$

$$\sum W = R(T_1 - T_2) \ln \left( \frac{V_A}{V_B} \right) - RT_2 \ln \left( \frac{V_B}{V_C} \right) + P_B (V_B - V_C)$$

Montrer que  $\sum W > 0$

Car cycle récepteur.

### Exercice 14 : Calculs de transferts thermiques et de variation d'énergie interne (\*\*)

Un gaz parfait monoatomique ( $C_V = \frac{3}{2}R$ ) est enfermé dans un cylindre fermé par un piston de masse négligeable pouvant coulisser sans frottement. La température est  $T_1 = T_{ext} = 293K$ , la pression  $p_1 = p_{atm} = 1\text{ atm}$ , le volume  $V_1 = 5L$ . La paroi du cylindre est *diathermane*. On donne :  $1\text{ atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ .

1. En appuyant très lentement sur le piston, on comprime le gaz à  $p_2 = 10\text{ atm}$ . Calculer  $V_2$ ,  $T_2$ ,  $\Delta U$  et  $Q$ .

2. Même question lorsqu'on passe brutalement de  $p_1$  à  $p_2$  en plaçant sur le piston la masse adéquate, en considérant l'arrêt du piston comme état final.

#### 1. Paroi diathermane

④ Transformation très lente

⇒ Équilibre thermique à chaque instant

⇒ Transformation isotherme

$$T_2 = T_1 = 293K$$

Grâce au GP :

$$PV = mRT$$

$$\text{donc : } \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \frac{mRT_2}{mRT_1} = 1$$

$$V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} = 0,5L$$

$$\Delta U = mC_V \Delta T = 0$$

1<sup>er</sup> principe :

$$\Delta U = W + Q = 0$$

$$\text{Or : } W = - \int_{V_1}^{V_2} P_{ext} dV = - \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV$$

$$= - \int_{V_1}^{V_2} \frac{mRT_1}{V} dV = - mRT_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$W = - mRT_1 \left[ \ln V \right]_{V_1}^{V_2}$$

$$W = mRT_1 \ln \frac{V_1}{V_2} \quad \text{avec } mRT_1 = P_1 V_1$$

$$W = P_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_2} = 10^5 \times 5 \times 10^{-3} \ln 10$$

$$\text{Donc : } Q = -1,17 \text{ kJ} = 1,17 \text{ kJ}$$

## 2. Transformation brusque

$\Rightarrow$  Transformation  $\simeq$  adiabatique  
 $\Rightarrow Q = 0$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} -P_{\text{ext}} \cdot dV = -P_{\text{ext}} \int_{V_1}^{V_2} dV = -P_2 \int_{V_1}^{V_2} dV$$

$$W = -P_2 (V_2 - V_1) = P_2 (V_1 - V_2)$$

1er principe :

$$\Delta U = W + Q = C_V \cdot \Delta T = n C_{V,m} (T_2 - T_1)$$

$$P_2 (V_1 - V_2) = n C_{V,m} (T_2 - T_1)$$

$$P_2 V_1 - P_2 V_2 = n C_{V,m} (T_2 - T_1)$$

$$\frac{10P_1V_1 - P_2V_2}{10nR(T_1 - T_2)} = n C_{V,m} (T_2 - T_1)$$

$$T_2 \times \frac{5}{2} = \frac{23}{2} T_1$$

$$T_2 = \frac{23}{5} T_1 = 1348 \text{ K}$$

GP:

$$P_2 V_2 = nRT_2 \quad \therefore P_1 V_1 = nRT_1$$

$$\frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} \frac{P_1}{P_2}$$

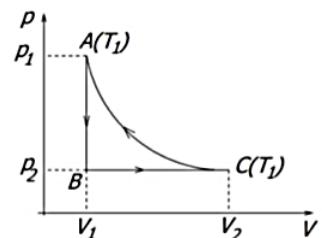
$$V_2 = 5 \times \frac{1348}{293} \times \frac{1}{10} = 2,3 \text{ L}$$

$$\Delta U = W = P_2 (V_1 - V_2) = 1,013 \cdot 10 \cdot 10^3 (5 - 2,3) \cdot 10^{-3} \\ = 2,79 \text{ kJ}$$

### Exercice 15 : Cycle pour un gaz parfait diatomique (\*\*)

On considère une mole de gaz parfait diatomique ( $C_{V_m} = \frac{5}{2}R$ ) à laquelle on fait subir de façon réversible le cycle  $ABCA$ :  $AB$  transformation isochore;  $BC$  transformation isobare;  $CA$  transformation isotherme. On a  $V_2 = 2V_1$ .

1. Quelle relation lie  $p_1$ ,  $V_1$ ,  $T_1$ , propriétés du gaz initialement?
2. Exprimer la température  $T_2$  relative à l'état  $B$  en fonction de  $T_1$ .
3. Exprimer les travaux et chaleurs échangés avec l'extérieur lors des étapes.
4. Appliquer le premier principe au cycle  $ABCA$ . Quelle relation entre  $C_{p_m}$  et  $C_{V_m}$  en découle?



$$1. P_1 V_1 = mRT_1 = RT_1$$

2. AB transformation isochore

$$\Leftrightarrow V_B = V_A = V_1$$

$$P_B V_B = RT_B \text{ et } P_A V_A = RT_A$$

d'où :

$$\frac{P_B V_B}{P_A V_A} = \frac{T_B}{T_A} \Rightarrow T_B = T_A \frac{P_B V_B}{P_A V_A} = T_1 \frac{P_B}{P_A}$$

$$\text{Non utile pour l'instant} \quad T_2 = T_1 \frac{P_2}{P_1}$$

( $P_2$  non connue)

$$BC \text{ transformation isobare.} \Leftrightarrow P_c = P_B$$

$$P_2 = \frac{P_1}{2} \quad \frac{P_c V_c}{P_B V_B} = \frac{T_c}{T_B} \Rightarrow T_c = T_B \frac{P_c V_c}{P_B V_B} = T_2 \frac{V_c}{V_B}$$

$$\text{d'où :} \quad = T_1$$

$$T_1 = T_2 \frac{V_c}{V_B} = T_2 \frac{V_c}{V_1}$$

$$T_1 = 2T_2 \quad T_2 = \frac{T_1}{2}$$

$$3. W_{AB} = - \int_{V_1}^{V_2} P_{ext} dV$$

AB détente  
⇒ Réexpansion  
⇒  $Q_{AB} < 0$

$$W_{AB} = - \int_{V_1}^{V_2} P dV = 0$$

$$Q_{AB} = ?$$

TRANSFO: isochore

1<sup>er</sup> principe  
avec U

On applique le premier principe à la transfo AB isochore

$$\Delta U_{AB} = W_{AB} + Q_{AB} = Q_{AB} = C_V \cdot \Delta T$$

$$Q_{AB} = C_V m \left( \frac{T_2}{2} - T_1 \right) = -C_V m \frac{T_1}{2} \quad (= C_V m (T_2 - T_1))$$

$$W_{BC} = - \int_{V_1}^{V_2} P_{ext} dV = - P_2 [V]_{V_1}^{V_2} = - P_2 (V_2 - V_1) \\ = - P_2 V_1 \quad (1)$$

TRANSFO  
ISOBARE :  
1<sup>er</sup> principe  
avec H

$Q_{BC}$  ?

Premier principe à la transfo BC isobare

$$\Delta H_{BC} = W_{BC} + Q_{BC} = C_{P,m} \Delta T$$

$$0 \neq P$$

$$= C_{P,m} (T_1 - T_2)$$

$$= C_{P,m} \frac{T_1}{2}$$

$$\Delta H_{BC} = Q_{BC} = C_{P,m} \frac{T_1}{2}$$

$$W_{CA} = - \int_{V_2}^{V_1} P \cdot dV = - \int_{V_2}^{V_1} \frac{RT_1}{V} dV$$

$$W_{CA} = - RT_1 \left[ \ln V \right]_{V_2}^{V_1} = - RT_1 \ln \frac{V_1}{V_2}$$

$$W_{CA} = RT_1 \ln 2$$

$Q_{CA}$  ?

Premier principe à la transfo isotherme CA :

$$\Delta U_{CA} = W_{CA} + Q_{CA} = C_{V,m} \Delta T = 0$$

d'où :

$$Q_{CA} = - RT_1 \ln 2$$

4.  $\Delta U_{cycle} = 0$

$$\Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta U_{CA} = 0$$

$$-C_{V,m} \frac{T_1}{2} - P_2 V_1 + C_{P,m} \frac{T_1}{2} = 0$$

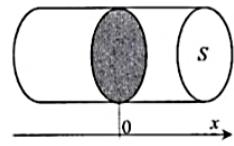
$$C_{P,m} - C_{V,m} = \frac{2P_2 V_1}{T_1} = \frac{P_1 V_1}{T_1} = R$$

$C_{P,m} - C_{V,m} = R$  Relation de Mayer !

### **Exercice 16 : Enceinte à 2 compartiments (\*\*)**

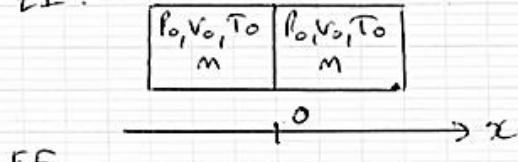
On place dans les deux compartiments d'une enceinte la même quantité  $n=2,00\text{mol}$  de deux gaz parfaits monoatomiques identiques. Ces deux compartiments sont séparés par un piston mobile de section  $S=200\text{cm}^2$ . Initialement, les deux gaz ont même température  $T_0=300\text{K}$ , même volume  $V_0=10,0\text{L}$  et même pression  $P_0=5,00\text{bar}$ , et le piston est au centre de l'enceinte, à l'abscisse  $x=0$ .

On donne :  $R=8,314\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$



1. On élève la température du gaz du compartiment de gauche jusqu'à  $T_F=350\text{K}$ , tout en maintenant la température du compartiment de droite à  $T_0$ . Calculer l'abscisse  $x$  du piston une fois le nouvel état d'équilibre atteint.
2. Calculer les variations d'énergie interne des gaz des compartiments gauche et droit, puis la variation d'énergie interne de l'ensemble des deux gaz, entre les 2 états d'équilibre.

1. EI :



EF

$P_F, V_1, T_F$	$P_F, V_2, T_0$
$m$	$m$

Egalité des pressions  
à l'état final car  
équilibre de la pression.

Etat initial :

$$P_0 V_0 = m R T_0 \Rightarrow V_0 = \frac{m R T_0}{P_0}$$

Etat final :

$$\left. \begin{array}{l} P_F V_1 = m R T_F \\ P_F V_2 = m R T_0 \end{array} \right\} \Rightarrow V_1 = \frac{m R T_F}{P_F} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \text{Pourquoi?} \end{array} \right\}$$

$$V_2 = \frac{m R T_0}{P_F}$$

Or :

$$V_1 + V_2 = 2 V_0$$

Où va je?

$$\frac{m R T_F}{P_F} + \frac{m R T_0}{P_F} = 2 \frac{m R T_0}{P_0}$$

$$\frac{T_F}{P_F} + \frac{T_0}{P_F} = 2 \frac{T_0}{P_0}$$

$P_F$  non demandée !

Etat final :

$$P_F V_1 = m R T_F \Rightarrow P_F = \frac{m R T_F}{V_1}$$

$$P_F V_2 = m R T_0 \Rightarrow P_F = \frac{m R T_0}{V_2}$$

Donc :

$$\frac{m R T_F}{V_1} = \frac{m R T_0}{V_2} \Rightarrow V_2 T_F - V_1 T_0 = 0 \quad (1)$$

D'autre part :

$$V_1 + V_2 = 2V_0 \quad (2)$$

$$V_2 = 2V_0 - V_1$$

$$(1) \Rightarrow (2V_0 - V_1)T_F - V_1 T_0 = 0$$

$$2V_0 T_F - V_1 (T_0 + T_F) = 0$$

$$V_1 = \frac{2T_F}{T_0 + T_F} V_0$$

$$\text{AN : } V_1 = \frac{2 \times 370}{300 + 370} \times 10 = 10,77 \text{ L}$$

$$\text{d'où : } V_1 - V_0 = 0,77 \text{ L}$$

Avec :

$$D'autre : (V_1 - V_0) = Sx$$

$$x = \frac{V_1 - V_0}{S} = \frac{0,77 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-4}}$$

$$x = 3,85 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 3,85 \text{ cm.}$$

$$x = \frac{2T_F V_0 - T_0 V_0 + T_F V_0}{S}$$

$$x = \frac{2T_F V_0 - T_0 V_0 + T_F V_0}{(T_0 + T_F) S}$$

$$x = \frac{T_F V_0 - T_0 V_0}{(T_0 + T_F) S}$$

$$x = \frac{V_0 (T_F - T_0)}{S (T_F + T_0)}$$

2. gaz monoatomique  
 $\Rightarrow U = \frac{3}{2} nR T$

$$\Rightarrow \Delta U = \frac{3}{2} nR \Delta T$$

Compartiment gauche :

$$\Delta U_1 = \frac{3}{2} nR (T_F - T_0) = \frac{3}{2} \times 2 \times 8,314 \times (370 - 300)$$

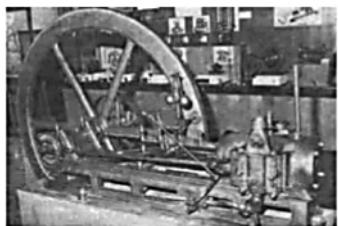
$$\Delta U_1 = 1,25 \cdot 10^3 \text{ J} = 1,25 \text{ kJ}$$

Compartiment droit :  $\Delta U_2 = 0$  car  $\Delta T = 0$

Variation totale d'énergie :

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 1,25 \text{ kJ}$$

### Exercice 17 : Cycle de Lenoir (\*\*)



Le cycle de Lenoir est un modèle idéalisé de cycle moteur à deux temps, introduit par Lenoir en 1860 pour décrire le fonctionnement du moteur à gaz qu'il avait mis au point l'année précédente. On raisonne sur l'air présent dans la chambre de combustion du moteur, modélisé par un gaz parfait. Après une phase d'admission d'air dans la chambre de combustion et le processus d'inflammation, l'air dans la chambre est caractérisé par  $T_1 = 100^\circ\text{C}$ ,  $V_1 = 10\text{ L}$  et  $P_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ . À partir de cet état 1, l'air constitue un système fermé de quantité de matière  $n_0$ . Le cycle qu'il subit se compose des étapes suivantes :

- ▷  $1 \rightarrow 2$  : explosion isochore jusqu'à la pression  $P_2$  ;
- ▷  $2 \rightarrow 3$  : détente isotherme jusqu'à un volume  $V_3 = 2V_1$  ;
- ▷  $3 \rightarrow 1$  : compression isobare jusqu'à revenir au volume initial.

Les gaz brûlés sont ensuite évacués hors de la chambre de combustion, et un nouveau cycle démarre.

1 - On cherche à représenter le cycle dans le diagramme de Watt ( $P, V$ ). Pour pouvoir définir les grandeurs d'état tout au long des transformations, on raisonne sur des transformations quasi-statique.

1.a - Déterminer l'équation d'une isotherme quasi-statique d'un gaz parfait dans le diagramme de Watt.

1.b - En déduire la représentation du cycle.

2 - Déterminer la température  $T_2 = T_3$  à laquelle a lieu la détente. En déduire la pression maximale atteinte  $P_2$ .

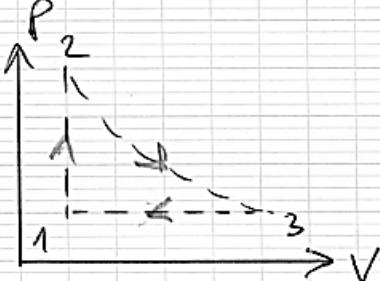
3 - Calculer le travail total *fourni* par le moteur au cours du cycle.

4 - Justifier sans calcul qu'entre le début et la fin du cycle  $\Delta U = 0$ . En déduire le transfert thermique reçu par le système. Quelle est la source de ce transfert ?

$$1a. PV = mRT \Rightarrow P = \frac{mRT}{V}$$

Équation d'une isotherme = hyperbole

1.5.



$$2. \text{ Entre } 1 \text{ et } 2: \quad PV = mRT$$

$$\frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{mais } P_2 \text{ inconnue}$$

$$\therefore \text{Entre } 3 \text{ et } 1: \quad PV = mRT$$

$$\frac{P_3 V_3}{P_1 V_1} = \frac{T_3}{T_1}$$

$$\Rightarrow T_3 = T_1 \frac{P_3 V_3}{P_1 V_1} = 373 \times 1 \times 2$$

$$\text{d'où: } P_2 = P_1 \frac{T_2 V_1}{T_1 V_2} = P_1 \frac{T_3}{T_1} = 2 P_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}_{(1)}$$

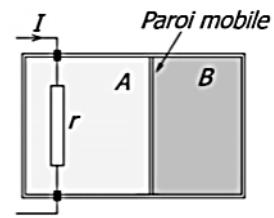
$$\begin{aligned}
 3. \quad W_{12} &= 0 \quad \text{car } dV = 0 \\
 W_{23} &= - \int_{V_2}^{V_3} P_{\text{ext}} \cdot dV \\
 &= - \int_{V_2}^{V_3} P \cdot dV \quad \text{car transfo. quasi statique.} \\
 &= - \int_{V_2}^{V_3} \frac{nRT}{V} dV \\
 &= - nRT_2 \left[ \ln V \right]_{V_2}^{V_3} \\
 &= - nRT_2 \ln \frac{V_3}{V_2} = - P_2 V_2 \ln \frac{V_3}{V_2} \\
 &= - 4 \cdot 10^5 \times 10 \cdot 10^{-3} \times \ln 2 \\
 &= - 2,7 \text{ kJ} \\
 W_{31} &= - \int_{V_3}^{V_1} P \cdot dV = - P_1 (V_1 - V_3) \\
 &= P_1 (V_3 - V_1) \\
 &= 2 \cdot 10^5 (20 - 10) \cdot 10^{-3} \\
 &= 2,0 \text{ kJ} \\
 \text{Bilan : } \sum W &= - 0,7 \text{ kJ} \\
 W_{\text{fourni}} &= 0,7 \text{ kJ.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 4. \quad \Delta U &= U_1 - U_1 = 0 \\
 \Delta U &= \sum W + Q \\
 \Rightarrow Q &= 0,7 \text{ kJ} \\
 \text{Transfert thermique} \\
 \rightarrow &\text{ Réac entre 1 et 2 (par explosion du gaz) notamment.}
 \end{aligned}$$

### Exercice 18 : Energie électrique fournie à un ensemble de deux gaz parfaits (\*\*)

On considère un récipient à parois rigides et calorifugées contenant deux gaz parfaits diatomiques ( $C_{V_m} = \frac{5}{2}R$ ) séparés par une paroi intérieure adiabatique mais mobile; les volumes occupés par chaque gaz A et B peuvent donc varier. Initialement les paramètres du système sont :  $p_0 = 1\text{bar}$ ,  $T_0 = 300\text{K}$ , et  $V_0 = 1\text{L}$  pour chaque gaz.

Un générateur électrique fournit de l'énergie au gaz A par l'intermédiaire d'un conducteur ohmique, de résistance  $r = 10\Omega$  parcouru par un courant continu  $I = 1\text{A}$ , pendant une durée  $\tau$  au bout de laquelle le volume du gaz A atteint la valeur  $1,1\text{L}$ . L'état final est alors défini par les valeurs :  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $p_A$ ,  $p_B$ ,  $T_A$ ,  $T_B$ .



1. Établir les équations reliant l'état initial et l'état final. En déduire qu'une équation supplémentaire est nécessaire pour connaître l'état final du système.
2. On admet, pour le gaz B, l'équation supplémentaire suivante :  $TV^{\gamma-1} = \text{cste}$  avec  $\gamma = 1,4$ . Trouver l'état final et la durée  $\tau$ .

1. Energie électrique fournie au compartiment A :

$$\Delta E = rI^2 \Sigma$$

\* Bilan d'énergie pour le compartiment A :

$$rI^2 \Sigma = \Delta U = m c_{v,m} (T_A - T_0)$$

(\*)

$$\begin{aligned} P_0 V_0 &= m R T_0 \\ P_A V_A &= m R T_A \end{aligned} \Rightarrow \frac{P_A V_A}{P_0 V_0} = \frac{T_A}{T_0} \quad (2)$$

$$\Delta U_A = W_A + Q_A + \Delta E \text{ avec } W_A \text{ travail reçu}$$

$\overset{\text{"}}{0}$  (adiabatique) } par compartiment A

\* Pour le compartiment B :

$$\Delta U_B = m c_{v,m} (T_B - T_0)$$

$$\Delta U_B = W_B + Q_B \text{ avec } W_B \text{ travail reçu par}$$

$\overset{\text{"}}{0}$  (adiabatique) } comp. B

(\*)

$$\frac{P_0 V_B}{P_0 V_0} = \frac{T_B}{T_0} \quad (3)$$

$$W_B = -W_A !$$

\* Bilan d'énergie global :

$$\Delta U = W_A + Q_A + \Delta E + W_B + Q_B$$

$$\Delta U = \Delta E = m c_{v,m} (T_A - T_0) + m c_{v,m} (T_B - T_0)$$

$$\underline{rI^2 \Sigma = m c_{v,m} (T_A - T_0) + m c_{v,m} (T_B - T_0)} \quad (1)$$

Remarque 1:  $V_0 = 1L$

$$V_A = 1,1L \rightarrow V_B = 0,9L$$

Donc:  $V_A$  et  $V_B$  connus.

Remarque 2:  $P_A = P_B$  car équilibre méca du piston  
Nous disposons de 3 équations (1), (2) et (3)  
pour 4 inconnues  $\Sigma$ ,  $P_A$ ,  $T_A$  et  $T_B$

2.  $TV^{\gamma-1} = \text{cte}$   $\gamma = 1,4$ .  
(Transfert adiabatique).

$$T_B V_B^{\gamma-1} = \text{cte} = T_0 V_0^{\gamma-1}$$

$$\text{d'où : } T_B = T_0 \left( \frac{V_0}{V_B} \right)^{\gamma-1} = 300 \left( \frac{1}{0,9} \right)^{1,4-1} = 313 \text{ K}$$

D'après (3):

$$\frac{P_B}{P_A} = P_0 \frac{T_B}{T_0} \frac{V_0}{V_B} = 1 \times \frac{313}{300} \times \frac{1}{0,9} = 1,16 \text{ bar}$$

$$P_A = P_B = 1,16 \text{ bar}$$

D'après (2):

$$T_A = T_0 \frac{P_A}{P_0} \frac{V_A}{V_0} = 300 \times \frac{1,16}{1} \times \frac{1,1}{1} = 383 \text{ K}$$

$$m = \frac{P_0 V_0}{RT_0}$$

$$= 40,1 \cdot 10^{-2} \text{ mol}$$

D'après (1)

$$\Sigma = \frac{mc_{v,m}(T_A + T_B - 2T_0)}{R I^2}$$

$$\Sigma = \frac{40,1 \cdot 10^{-2} \times \frac{5}{2} \times 8,31 \times (383 + 313 - 2 \times 300)}{10 \times 1^2}$$

$$\Sigma = 8 \text{ s}$$

### **Exercice 19 : Puissance et énergie (\*)**

- 3) Quelle est la consommation électrique lorsque vous réchauffez un plat pendant 2 min avec votre four à micro-ondes de puissance  $P = 800 \text{ W}$  ?
- 2) Le plus petit abonnement électrique prévoit une puissance disponible de  $3 \text{ kVA}$  (ou  $3 \text{ kW}$ ). Un studio occupé par une personne induit une consommation annuelle d'environ  $2000 \text{ kWh}$  pour le chauffage,  $800 \text{ kWh}$  pour l'eau chaude,  $200 \text{ kWh}$  pour la cuisine,  $1000 \text{ kWh}$  pour l'éclairage, les appareils électroménagers, etc.
  - a) Quelle est l'énergie consommée sur l'année ?
  - b) Quelle est la puissance moyenne consommée sur l'année ?
- 3) « Le barrage de Guerlédan est la quatrième source d'électricité de Bretagne et contribue ainsi à réduire le déficit énergétique de cette région. Il produit  $28 \text{ GWh/an}$  pour une puissance installée de  $16 \text{ MW}$ . » Comparer la puissance moyenne et la puissance nominale du barrage. Expliquer l'écart entre les deux.

**Remarque :** *L'importance de ce barrage ne vient pas de la quantité d'énergie produite, mais de son rôle d'appoint lors des pics de consommation, en hiver, entre 18 et 20 h. Ses turbines peuvent être démarrées rapidement pour faire face à la demande.*

### **Exercice 20 : Energies dans une centrale thermique (\*\*)**

Dans une centrale thermique, l'énergie libérée par la combustion d'un combustible (charbon, fioul...) permet de chauffer l'eau d'un circuit primaire et d'obtenir ainsi de la vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur entraîne en rotation la turbine et l'alternateur qui lui sont reliés. L'énergie mécanique de cet ensemble est convertie en énergie électrique, distribuée sur le réseau. 40% de l'énergie chimique libérée par combustion est ainsi récupérée sous forme électrique. Un circuit de refroidissement assure la condensation de la vapeur et l'eau est ainsi réinjectée dans la chaudière : le cycle recommence.

1. Faire un schéma du cycle indiquant les 4 éléments cités dans le document.
2. Préciser dans quelle partie du cycle l'eau est liquide ou sous forme vapeur.
3. Dans chacun des éléments par lesquels circule l'eau, préciser si l'eau cède ou reçoit de l'énergie.
4. L'alternateur convertit une forme d'énergie en une autre. Quelles sont-elles ?
5. Pourquoi l'énergie libérée par combustion n'est-elle pas totalement récupérée sous forme électrique ?

### **Exercice 21 : Calorimétrie (\*\*)**

### 1. Méthode des mélanges : application à la mesure de la chaleur massique $c$ du cuivre

Dans un calorimètre (réceptacle adiabatique) de valeur en eau  $\mu = 20\text{g}$ , on introduit une masse  $M = 500\text{g}$  d'eau à la température  $\theta_0 = 12,7^\circ\text{C}$ . Un morceau de cuivre de masse  $m = 175,8\text{g}$  et porté à la température  $\theta_s = 84,0^\circ\text{C}$  est placé dans le calorimètre. On laisse le système évoluer jusqu'à atteindre un état d'équilibre thermodynamique : la température vaut alors  $\theta_f = 14,9^\circ\text{C}$ .

D'après ces valeurs, déterminer la capacité massique  $c$  du cuivre.

On donne la capacité massique de l'eau :  $c_{eau} = 4,18\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ .

### 2. Méthode électrique : application à la mesure de la chaleur massique $c$ de l'éthanol

Dans un calorimètre de valeur en eau  $\mu = 20\text{g}$ , on introduit une masse  $M = 400\text{g}$  d'éthanol à la température  $\theta_1 = 16,64^\circ\text{C}$ . Dans ce liquide plonge une résistance chauffante qui est parcourue par un courant  $I = 178 \times 10^{-3}\text{A}$  sous une tension  $U = 30\text{V}$  pendant une durée  $\tau = 6\text{min}$ . A l'issue de ce chauffage, la température du liquide est  $\theta_2 = 18,45^\circ\text{C}$ .

A l'aide de ces valeurs, déterminer la capacité massique  $c$  de l'éthanol ( $c_{eau} = 4,18\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ ).

### Exercice 22 : Recherche de l'état final d'un système (\*\*)

Dans un calorimètre de valeur en eau  $\mu = 20\text{g}$ , dont les parois sont parfaitement adiabatiques et initialement à  $\theta_2 = 20^\circ\text{C}$ , on introduit une masse  $m_1 = 0,12\text{kg}$  de glace à  $\theta_1 = 0^\circ\text{C}$ , une masse  $m_2 = 0,26\text{kg}$  d'eau liquide à  $\theta_2 = 20^\circ\text{C}$  et une masse  $m_3 = 0,1\text{kg}$  de vapeur d'eau à  $\theta_3 = 100^\circ\text{C}$ .

La pression est constante et égale à 1atm.

Décrire l'état final du système.

*Données :* Chaleur latente de fusion de la glace à  $0^\circ\text{C}$  :  $L_f = 334,8\text{kJ.kg}^{-1}$   
Chaleur latente de vaporisation de l'eau à  $100^\circ\text{C}$  :  $L_v = 2260\text{kJ.kg}^{-1}$   
Capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c_l = 4,185\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

### Exercice 23 : Pertes thermiques (\*\*)

Une maison subit, pendant une durée  $dt$ , des pertes thermiques à travers mur et toit d'expression :

$$\delta Q_{pertes} = K (T(t) - T_0) dt$$

où  $T(t)$  est la température intérieure,  $T_0$  la température extérieure et  $K$  un facteur constant.

1. Commenter cette expression.

Le chauffage de la maison est coupé à l'instant  $t = 0$ , on note  $T_1$  la température initiale, on suppose  $T_0$  constante.  $T_1 > T_0$ .

2. Quelle va être la température finale de la maison ?

On note  $C_{maison}$  la capacité thermique totale de l'habitation.

3. Réaliser un bilan énergétique pour la maison sur une durée infinitésimale  $dt$ . En déduire l'équation différentielle liant  $T$  et  $t$ .

4. Déterminer l'évolution  $T(t)$  de la température intérieure au cours du temps.

### Exercice 24 : Température d'une résistance électrique (\*\*)

Une résistance électrique de capacité thermique  $C$  est placée dans une pièce à la température  $T_0$  supposée constante.

Initialement, la résistance est en équilibre thermique avec la pièce à la température à  $T_0$ . À  $t = 0$ , on fait passer un courant dans la résistance qui dissipe par effet Joule une puissance constante  $P$  dans la résistance.

Lorsque la température de la résistance est  $T$ , on admet qu'il y a un transfert thermique de la résistance vers le milieu extérieur de la forme  $aC(T - T_0)dt$  pendant un temps infinitésimal  $dt$ ,  $a$  étant une constante positive.

- 1) Régime permanent : à l'aide d'un bilan énergétique en régime permanent, donner la température limite  $T_\infty$  si  $t$  tend vers l'infini.
- 2) Écrire un bilan énergétique entre deux instants voisins  $t$  et  $t + dt$  et déterminer l'équation différentielle liant  $T$  et  $t$ . Contrôler son homogénéité. Retrouver  $T_\infty$ .
- 3) Intégrer cette équation pour déterminer  $T(t)$ .

### Exercice 25 : Chauffe-eau solaire (\*\*)

On se propose de déterminer le temps que met un chauffe-eau solaire de  $4 \text{ m}^2$  pour chauffer l'eau du réservoir (200 litres) de  $20^\circ\text{C}$  à  $70^\circ\text{C}$ .

Données :

Puissance émise par le soleil :  $P_{soleil} = 386.10^{24} \text{ W}$

Distance Terre Soleil :  $d = 1,5.10^{11} \text{ m}$

Surface du capteur perpendiculaire au flux solaire :  $S = 4 \text{ m}^2$

Rendement du capteur solaire :  $\eta = 40 \%$

Volume du réservoir (ballon) :  $V = 200 \text{ L}$

Chaleur massique de l'eau :  $c_0 = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

On rappelle la surface d'une sphère de rayon  $R$  :  $4\pi R^2$

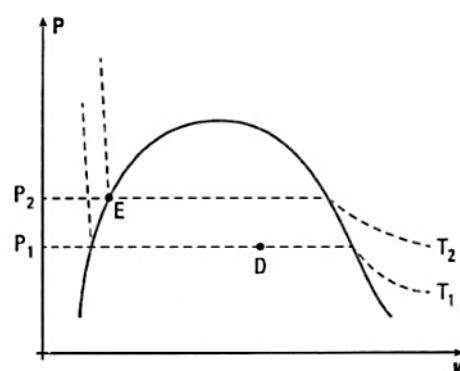
- 1) Sachant que le soleil rayonne sa puissance uniformément dans toutes les directions, déterminer la puissance  $P_{capteur}$  reçue par les  $4 \text{ m}^2$  du capteur.
- 2) Déterminer la puissance  $P$  destinée au chauffage de l'eau.
- 3) Déterminer l'énergie nécessaire pour éléver la température de l'eau de  $20$  à  $70^\circ\text{C}$ .
- 4) Calculer enfin le temps  $\Delta t$  nécessaire au chauffage de l'eau.

Rép. :  $P_{capteur} = 5,5 \text{ kW}$ ;  $P = 2,2 \text{ kW}$ ;  $\Delta U = 42 \text{ MJ}$  ( $\rho_{eau}$  supposée connue);  $\Delta t = 1,9.10^4 \text{ s} = 5 \text{ h } 20 \text{ min}$

### Exercice 26 : Isothermes d'Andrews (\*)

Dans le diagramme de Clapeyron ci-contre, on considère deux isothermes d'Andrews de température  $T_1$  et  $T_2$ .

1. La température  $T_1$  est-elle supérieure ou inférieure à la température  $T_2$ ?
2. Placer sur le diagramme les points suivants :
  - A : Vapeur saturante à la pression  $P_1$  sans liquide
  - B : Vapeur sèche à la pression  $P_1$  à la température  $T_2$
  - C : Liquide seul à la pression  $P_2$  à la température  $T_2$
3. Quel est l'état du système aux points D et E?



### Exercice 27 : Chauffage isobare d'un mélange liquide-vapeur (\*\*)

Un cylindre muni d'un piston contient  $0,1\text{m}^3$  d'eau liquide et  $0,9\text{m}^3$  d'eau vapeur en équilibre sous 5 bars. Un transfert thermique isobare porte la température à  $200^\circ\text{C}$ .

1. Quelle est la température initiale?
2. Quelle est la masse totale d'eau?
3. Quel est le volume final?
4. Représenter la transformation en diagramme de Clapeyron.

On donne quelques extraits de tables thermodynamiques de l'eau :

- Sous 5 bars, la température d'ébullition de l'eau est  $151,86^\circ\text{C}$ , le volume massique du liquide est  $\nu_l = 1,093 \times 10^{-3}\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$  et le volume massique de la vapeur est  $\nu_v = 0,3749\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$ .
- Pour l'eau, entre  $100$  et  $200^\circ\text{C}$ , la pression de vapeur saturante est donnée, de façon approchée, par la formule de Duperray :  $P(\text{en bars}) \approx \left(\frac{t}{100}\right)^4$  ( $t$  en  $^\circ\text{C}$ ).