

Données utiles

$$M_{\text{air}} = 29,0 \text{ g.mol}^{-1} \quad \gamma = 1,40 \text{ pour l'air (assimilé à un gaz parfait diatomique)}$$

$$R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$$

$$c_{\text{fonte}} = 0,54 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1} \quad c_{\text{eau}} = 4,2.10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$

Exercice 1 Montée en température d'une poêle

Une poêle en fonte de masse  $m = 800 \text{ g}$  est placée sur une plaque électrique à induction de puissance  $P_{\text{elec}} = 1200 \text{ W}$ .



Evaluer la durée nécessaire pour amener la poêle de  $20^\circ\text{C}$  (température ambiante) à  $200^\circ\text{C}$ .

La durée réelle sera-t-elle supérieure ou inférieure à votre estimation ?

Exercice 2 Transformations d'un gaz parfait

Pour chacune des transformations suivantes (supposées réversibles) :

- indiquer la valeur initiale et la valeur finale de la pression  $P$ , du volume  $V$  et de la température  $T$
- représenter l'allure de la transformation dans un diagramme  $(P,V)$  en précisant le sens
- calculer le travail  $W$  et le transfert thermique  $Q$  reçus par l'air

- 1 ) Une mole d'air est comprimée de 1,0 bar à 3,0 bar à température constante ( $150^\circ\text{C}$ ).
- 2 ) Un volume initial de  $1,0 \text{ m}^3$  d'air est chauffé de façon isobare (1013 hPa) de 300 K à 600 K.
- 3 ) 1 kg d'air, initialement à 900 K et sous 20 bar, subit une détente adiabatique : son volume est multiplié par 5.
- 4 ) Un volume de 10,0 L d'air initialement sous 1,0 bar et à  $20^\circ\text{C}$ , subit un chauffage isochore jusqu'à  $500^\circ\text{C}$ .

Exercice 3 La piscine

Données : tarif EDF heures creuses : 0,11€ le kWh



Au mois de mars, la température de l'eau de la piscine est de  $8^\circ\text{C}$ , égale à la température moyenne journalière de l'air. Les dimensions approximatives de la piscine sont  $3\text{m} \times 5\text{m} \times 1,5\text{m}$ .

1 ) On souhaite amener l'eau de la piscine à  $30^\circ\text{C}$  avec un chauffage électrique classique (rendement égal à 1) : en négligeant les pertes, calculer le montant (en €) à dépenser.

La puissance perdue par transfert thermique au contact de l'air peut être approchée par  $P_{\text{perdue}} = hS(T_{\text{eau}} - T_{\text{air}})$  où  $h = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  et  $S$  (en  $\text{m}^2$ ) est la surface de contact entre l'eau et l'air.

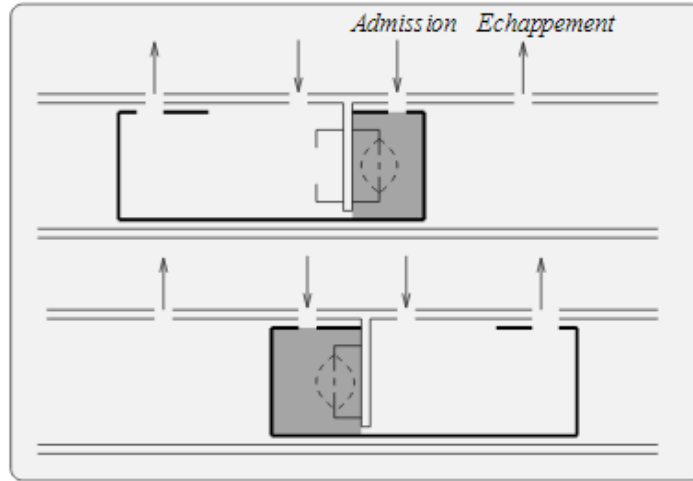
2 ) Calculer le coût journalier du maintien de la piscine à  $30^\circ\text{C}$ . Proposer plusieurs solutions pour réduire ce coût.

### Exercice 4 Cycle de Lenoir

Le cycle de Lenoir (1860) est associé au premier moteur à combustion interne à deux temps :

- 1<sup>er</sup> temps : admission du mélange (combustible + air), combustion, détente
- 2<sup>ème</sup> temps : échappement (évacuation des produits de la combustion)

Le piston est à double effet (la pression agit à chaque demi-tour sur l'une des faces) :



On modélise ce cycle réel de la façon suivante : de l'air (gaz parfait) subit le cycle suivant au contact de deux sources de température  $T_f = 300 \text{ K}$  et  $T_c = 600 \text{ K}$  (on suppose toutes les transformations *mécaniquement réversibles*)

- 1  $\Rightarrow$  2 : échauffement isochore jusqu'à  $T_c$ , au contact de la source chaude
- 2  $\Rightarrow$  3 : détente isotherme au contact de la source chaude
- 3  $\Rightarrow$  1 : refroidissement isobare au contact de la source froide

Initialement, l'air est dans l'état  $P_1 = 1,0 \text{ bar}$ ,  $T_1 = T_f$  et  $V_1 = 1,0 \text{ L}$ . On donne  $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

1 ) Donner l'allure du cycle dans le diagramme (P,V) de Clapeyron. S'agit-il d'un cycle moteur ou récepteur ? Justifier graphiquement à l'aide de l'aire algébrique du cycle.

On rappelle que  $W = - \int_i^f P dV$  pour les transformations *mécaniquement réversibles*.

2 ) Compléter le tableau avec des valeurs numériques :

Etat	Température (K)	Pression (bar)	Volume (L)
1	300	1,0	1,0
2			
3			

3 ) Calculer numériquement la quantité de matière  $n$  et la capacité thermique  $C_v$  de l'air étudié.

4 ) Calculer numériquement le travail et le transfert thermique reçus par le gaz au cours de chaque phase (on les notera  $W_{12}$ ,  $Q_{12}$ ,  $W_{23}$ ,  $Q_{23}$ ,  $W_{31}$  et  $Q_{31}$  )

5 ) Sur un cycle, calculer numériquement le transfert thermique  $Q_c$  reçu de la source chaude, ainsi que le travail total  $W$  reçu au cours du cycle. En déduire le rendement  $\eta$  du cycle.

6 ) Calculer l'entropie créée  $S_{cr}$  au cours du cycle. Ce cycle est-il réversible ?

Question supplémentaire : dans quelle(s) phase(s) du cycle y a-t-il création d'entropie ?

**Exercice 1** Montée en température d'une poêle

Premier principe appliqué à un solide :  $\Delta H=Q$  (ou  $\Delta U=Q$  )

On a  $\Delta H=C\Delta T=m c_{\text{fonte}}(T_f-T_i)$  et  $Q=P_{\text{thermique}}\Delta t=P_{\text{elec}}\Delta t$  où  $\Delta t$  est la durée de la transformation

On en déduit  $\Delta t = \frac{m c_{\text{fonte}}(T_f-T_i)}{P_{\text{elec}}} = 65 \text{ s}$  .

La conversion d'énergie électrique en transfert thermique au fond de la poêle n'est pas parfaite

=> la puissance thermique  $P_{\text{thermique}}$  réellement disponible est inférieure à  $P_{\text{elec}}$ , donc  $\Delta t_{\text{réel}} > \Delta t_{\text{calculé}}$

On a négligé le transfert thermique entre la poêle et l'air environnant, et entre la poêle et la plaque

=> il faudrait tenir compte de l'échauffement de l'air et de la plaque,  $\Delta H_{\text{réel}} > \Delta H_{\text{calculé}} \Rightarrow \Delta t_{\text{réel}} > \Delta t_{\text{calculé}}$

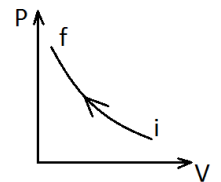
La durée réelle de chauffe sera supérieure à celle calculée.

**Exercice 2** Transformations d'un gaz parfait

1)  $P_i = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$        $T_i = 423 \text{ K}$        $n = 1 \text{ mol} \Rightarrow V_i = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$   
 $P_f = 3,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$        $T_f = 423 \text{ K}$        $\Rightarrow V_f = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV = -nRT_0 \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = -nRT_0 \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) = 3,8 \cdot 10^3 \text{ J}$$

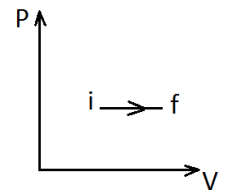
$$Q = \Delta U - W = C_V \Delta T - W = 0 - W = -3,8 \cdot 10^3 \text{ J} \text{ (isotherme)}$$



2)  $P_i = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$        $V_i = 1,0 \text{ m}^3$        $T_i = 300 \text{ K}$        $\Rightarrow n = 41 \text{ mol}$   
 $P_f = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$        $T_f = 600 \text{ K}$        $\Rightarrow V_f = 2,0 \text{ m}^3$

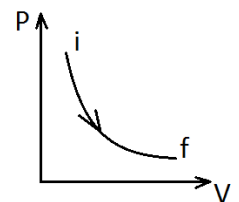
$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV = -P_0 \int_{V_i}^{V_f} dV = -P_0 (V_f - V_i) = -1,0 \cdot 10^5 \text{ J}$$

$$Q = \Delta U - W = C_V \Delta T - W = \frac{nR}{\gamma-1} (T_f - T_i) - W = 3,6 \cdot 10^5 \text{ J}$$



3)  $P_i = 20 \cdot 10^5 \text{ Pa}$        $T_i = 900 \text{ K}$        $n = m/M = 34,5 \text{ mol} \Rightarrow V_i = 0,13 \text{ m}^3$   
 $V_f = 5 V_i = 0,65 \text{ m}^3$        $P_f = P_i (V_i/V_f)^\gamma = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$        $\Rightarrow T_f = 476 \text{ K}$

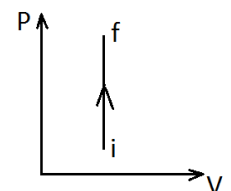
$$Q=0 \text{ (adiabatique)} \quad W = \Delta U - Q = C_V \Delta T = \frac{nR}{\gamma-1} (T_f - T_i) = -3,01 \cdot 10^5 \text{ J}$$



4)  $P_i = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$        $T_i = 293 \text{ K}$        $V_i = 10,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$        $\Rightarrow n = 0,41 \text{ mol}$   
 $V_f = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$        $T_f = 773 \text{ K}$        $\Rightarrow P_f = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV = 0 \text{ (isochore)}$$

$$Q = \Delta U - W = C_V \Delta T - 0 = \frac{nR}{\gamma-1} (T_f - T_i) = 4,1 \cdot 10^3 \text{ J}$$



**Exercice 3** La piscine

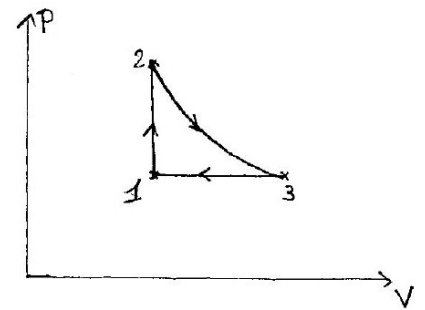
1)  $\Delta U = Q = V \cdot \mu_{\text{eau}} (T_f - T_i) = 2,1 \cdot 10^9 \text{ J} = 577,5 \text{ kWh}$  donc 63,5 €

2)  $\Delta U = -P_{\text{perdue}} \cdot \Delta t + Q_{\text{maintien}} = 0$  donc  $Q_{\text{maintien}} = 2,85 \cdot 10^8 \text{ J} = 79,2 \text{ kWh}$  donc 8,7 €

On peut réduire ce coût en évitant le contact avec l'air froid (bâche) ou simplement en exigeant une température légèrement plus faible que 30°C,

### Exercice 4 Cycle de Lenoir

1) Graphiquement, l'aire algébrique entourée par le cycle est positive :  $A > 0$  (l'aire sous la courbe  $2 \Rightarrow 3$ , comptée positivement, est supérieure en valeur absolue à l'aire sous la courbe  $3 \Rightarrow 1$ , comptée négativement).



On a  $W = - \int_{\text{cycle}} P dV = -A$  donc  $W < 0$ , le cycle est moteur (sur un cycle, le gaz fournit du travail au milieu extérieur).

2) On utilise la loi de gaz parfaits pour obtenir les valeurs indiquées en gras

Etat	Température (K)	Pression (bar)	Volume (L)
1	300	1,0	1,0
2	600	2,0	1,0
3	600	1,0	2,0

$$3) \quad n = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \quad C_V = \frac{nR}{\gamma - 1} = 0,83 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$4) \quad W_{12} = 0 \text{ J (volume constant)} \quad Q_{12} = \Delta U_{12} - W_{12} = C_V (T_2 - T_1) = 2,5 \cdot 10^2 \text{ J}$$

$$W_{23} = - \int_{V_2}^{V_3} P dV = -nRT_C \int_{V_2}^{V_3} \frac{dV}{V} = -nRT_C \ln \left( \frac{V_3}{V_2} \right) = -1,4 \cdot 10^2 \text{ J}$$

$$Q_{23} = \Delta U_{23} - W_{23} = 0 - W_{23} = +1,4 \cdot 10^2 \text{ J} \quad (\Delta U_{23} = 0 \text{ car } T_3 = T_2)$$

$$W_{31} = - \int_{V_3}^{V_1} P dV = -P_1 \int_{V_3}^{V_1} dV = -P_1 (V_3 - V_1) = 1,0 \cdot 10^2 \text{ J}$$

$$Q_{31} = \Delta U_{31} - W_{31} = C_V (T_1 - T_3) - W_{31} = -3,5 \cdot 10^2 \text{ J}$$

5) Le transfert thermique au contact de la source chaude s'effectue sur les phases  $1 \Rightarrow 2$  et  $2 \Rightarrow 3$

$$\text{On a donc } Q_C = Q_{12} + Q_{23} = 3,9 \cdot 10^2 \text{ J}$$

Le travail total échangé au cours du cycle s'obtient en sommant tous les travaux :  $W = W_{12} + W_{23} + W_{31} = -40 \text{ J}$

On en déduit le rendement  $\eta = \frac{-W}{Q_C} = 0,10$  soit un rendement de 10 %.

6) Sur un cycle,  $\Delta S_{\text{cycle}} = 0 = S_{\text{éch}} + S_{\text{cr}} = \frac{Q_{12}}{T_C} + \frac{Q_{23}}{T_C} + \frac{Q_{31}}{T_F} + S_{\text{cr}}$ , on en déduit  $S_{\text{cr}} = 0,51 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} > 0$ , le cycle n'est pas réversible.

En réutilisant l'expression  $\Delta S = nR \left( \frac{1}{\gamma - 1} \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) + \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \right)$  (exercice 5) et en appliquant le second principe à

chacune des transformations, on observe que  $S_{\text{cr}} = 0$  pour la transformation isotherme ( $2 \Rightarrow 3$ ), et  $S_{\text{cr}} > 0$  pour l'échauffement ( $1 \Rightarrow 2$ ) et le refroidissement ( $3 \Rightarrow 1$ ). Pour qu'une transformation soit réversible, on doit avoir à tout instant  $T = T_{\text{ext}}$  (température du système égale à la température de contact), ce qui n'est pas le cas au cours des transformations  $1 \Rightarrow 2$  et  $2 \Rightarrow 3$ .