

Courgé expos thermo 3

Exercice 1:

1) réfrigérateur : machine diatherme réceptrice qui prélève de l'énergie thermique à une source froide pour en donner à une source chaude grâce à un transfert mécanique reçu.

2) le fonctionnement étant réversible : $\eta = \eta_{\text{rév}} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$
 Alors $T_C - T_F = \frac{T_F}{\eta} \Rightarrow T_C = T_F \left(1 + \frac{1}{\eta}\right)$
 $T_C = 298K$ (25°C)

3) - $Q_F = -Q_{\text{eau}}$ (Q_{eau} = transfert thermique reçu par la source froide)
 reçu par le fluide frigorigère.

L'eau subit une transformation isobare : $\Delta H_{\text{eau}} = Q_{\text{eau}} = -Q_F$
 $\Delta H_{\text{eau}} = m c_{\text{liq}} (T_{\text{fus}} - T_i) - m l_{\text{fus}} (T_{\text{fus}}) + m c_g (T_{\text{fus}} - T_f)$

avec $m = 1\text{kg}$ $T_{\text{fus}} = 273K$ $T_i = 293K$ et $T_f = 255K$

$$Q_F = -\Delta H_{\text{eau}} \quad \text{et} \quad \eta = \frac{Q_F}{W} \quad \text{donc} \quad W = \frac{Q_F}{\eta}$$

$$W = \frac{1}{\eta} m (c_{\text{liq}} (T_i - T_{\text{fus}}) + l_{\text{fus}} (T_{\text{fus}}) + c_g (T_{\text{fus}} - T_f))$$

$$W = \frac{1}{6} \cdot 1 \cdot (4,18 \cdot (20) + 335 + 2,05 \cdot (18)) \quad \underline{W = 75,9 \text{ kJ}}$$

Exercice 2:

1) - Cycle moteur - L'aire du rectangle $\triangle ABCD$ correspond au transfert thermique reçu, qui est positif car $Q_{AB} > 0$ et $Q_{CD} < 0$ et $|Q_{AB}| > |Q_{CD}|$

Ainsi $W_{\text{cycle}} = -Q_{\text{cycle}}$; avec $Q_{\text{cycle}} > 0$ alors $\frac{W_{\text{cycle}}}{Q_{\text{cycle}}} < 0$ (cycle moteur)

2) L'isotherme T_1 (transformation $A \rightarrow B$) correspond au contact avec la source chaude $\Rightarrow Q_C = Q_{A \rightarrow B}$ = aire sous la courbe AB .
 L'isotherme T_2 (transformation $C \rightarrow D$) correspond au contact avec la source froide $\Rightarrow Q_F = Q_{C \rightarrow D}$ = - aire sous la courbe CD .

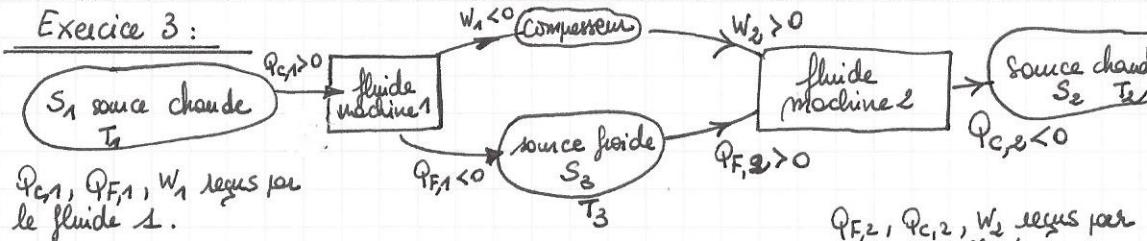
Le rendement de ce moteur diatherme est : $\eta = \frac{|W|}{Q_C}$

$$|W| = \text{aire du rectangle } ABCD \quad |W| = (T_1 - T_2)(S_2 - S_1)$$

$$\text{et } Q_C = Q_{AB} = T_1(S_2 - S_1) \Rightarrow \eta = \frac{\text{Aire}(ABCD)}{\text{Aire}(ABK_1K_2)}$$

$$\text{Alors} \quad \eta = \frac{(T_1 - T_2)(S_2 - S_1)}{T_1(S_2 - S_1)} \quad \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Exercice 3:



$Q_{c,1}, Q_{f,1}, W_1$ reçus par le fluide 1.

$Q_{f,2}, Q_{c,2}, W_2$ reçus par le fluide 2.

Le but de l'installation est de chauffer la source S_2 , en prélevant de la chaleur à la source S_1 .

1^{er} Principe | pour le fluide n°1 : ① $W_1 + Q_{c,1} + Q_{f,1} = 0$ et $\frac{Q_{f,1}}{T_2} + \frac{Q_{c,1}}{T_1} = 0$
 et 2^e Principe |

pour le fluide n°2 : ② $W_2 + Q_{c,2} + Q_{f,2} = 0$ et $\frac{Q_{c,2}}{T_2} + \frac{Q_{f,2}}{T_3} = 0$

On cherche à exprimer $Q_{c,2}$ en fonction de $Q_{c,1}$:

$W_1 = -W_2$ donc :

$$\text{①} + \text{②} : Q_{c,1} + Q_{f,1} + Q_{c,2} + Q_{f,2} = 0 \quad \text{et} \quad \begin{cases} Q_{f,1} = -\frac{T_3}{T_1} Q_{c,1} \\ Q_{f,2} = -\frac{T_2}{T_3} Q_{c,2} \end{cases}$$

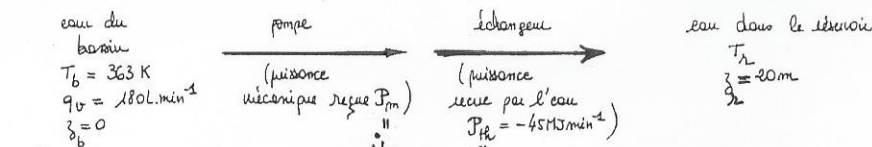
$$\text{alors} \quad Q_{c,1} - \frac{T_3}{T_1} Q_{c,1} + Q_{c,2} - \frac{T_2}{T_3} Q_{c,2} = 0$$

$$\eta = \frac{-Q_{c,2}}{Q_{c,1}} = \frac{1 - \frac{T_3}{T_1}}{1 - \frac{T_2}{T_3}} \quad \eta = \frac{1 - \frac{270}{300}}{1 - \frac{270}{300}} = 5,5$$

Il est donc plus avantageux d'utiliser S_1 pour faire fonctionner l'installation que de donner directement $Q_{c,1}$ à la source S_2 .

Systèmes ouverts

Exercice 4:



On envisage le système ouvert {eau dans pompe + échangeur}. Le 1^{er} principe s'écrit en terme de puissance, au fluide (eau) en écoulement stationnaire :

$$\left(\frac{1}{2} \rho v_R^2 + g z_R + h_R \right) \dot{m}_R - \left(\frac{1}{2} \rho v_b^2 + g z_b + h_b \right) \dot{m}_b = P_m + P_R$$

L'indice a désigne les grandeurs du réservoir et b celles du bassin.

L'énergie cinétique macroscopique est négligée donc :

$$\left[g(z_R - z_b) + (h_R - h_b) \right] \dot{m} = P_m + P_R \quad \text{car } \dot{m}_R = \dot{m}_b = \dot{m}$$

Or on donne $q_v = \dot{V}$ débit volumique donc $\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho q_v$.

et $h_R - h_b = c(T_R - T_b)$ donc :

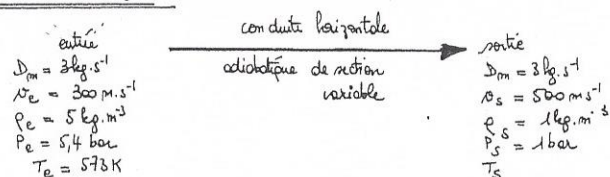
$$c(T_R - T_b) \rho q_v = P_m + P_R - g z_R \quad \text{car } z_b = 0.$$

$$T_R = T_b + \frac{1}{c \rho q_v} (P_m + P_R - g z_R)$$

A.N. $T_R = 363 + \frac{1}{4,18 \times 10^3 \times 3,10^{-3}} (2,10^3 - 450 \times 10^3 - 9,8 \times 20)$ avec $\rho = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
 $q_v = 3,10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$

$$T_R = 363 - 60 = 303 \text{ K. (soit } 30^\circ\text{C)}.$$

Exercice 5:



h_{pe} :

$$C_{p,m} = \frac{7}{2} R \quad \text{pour l'air. suppose parfait}$$

1) On applique le 1^{er} principe à la masse d'air en écoulement stationnaire :

$$\left(\frac{1}{2} \rho v_s^2 + g z_s + h_s \right) \dot{m}_s - \left(\frac{1}{2} \rho v_e^2 + g z_e + h_e \right) \dot{m}_e = \dot{W}_u + \dot{Q}$$

or $z_s = z_e$, $\dot{m}_s = \dot{m}_e = \dot{D}_m$, $\dot{W}_u = 0$, $\dot{Q} = 0$ (adiabatique)
 donc : conduit sans apport de travail.

$$h_s - h_e = \frac{1}{2} (v_e^2 - v_s^2).$$

2) or $h_s - h_e = \frac{1}{M} C_{p,m} (T_s - T_e) = \frac{1}{2} (v_e^2 - v_s^2) \Rightarrow T_s = T_e + \frac{M}{2 C_{p,m}} (v_e^2 - v_s^2)$

A.N. : $T_s = 573 + \frac{29,10^{-3}}{2 \times \frac{7}{2} \times 8,31} (300^2 - 500^2) = 573 - 80 = 493 \text{ K.}$

lors d'une détente Joule Thomson, on néglige la variation d'énergie cinétique.

le bilan conduit donc à :

$$h_s - h_e = 0 \quad \text{d'où}$$

$$T_s = T_e \quad \text{pour un gaz parfait.}$$

3)

$$s_s - s_e = \frac{C_{p,m}}{M} \ln \frac{T_s}{T_e} - \frac{R}{M} \ln \frac{p_s}{p_e}$$

différence d'entropie molaire du GP.

$$s_s - s_e = \frac{7}{2} \frac{R}{M} \ln \frac{T_s}{T_e} - \frac{R}{M} \ln \frac{p_s}{p_e}$$

(dédit de l'identité therm. : $dh = T ds + v dp$ pour $m = 1 \text{ kg}$ $ds = \frac{c_p dt}{T} - \frac{R}{M} \frac{dp}{p}$)

A.N. $ds = \frac{7}{2} \frac{8,31}{29,10^{-3}} \ln \frac{493}{573} - \frac{8,31}{29,10^{-3}} \ln \frac{1}{5,4}$

$$\Delta s = 332 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

le bilan entropique s'écrit :

$$(s_s - s_e) \dot{m} = \frac{dS_{\text{créé}}}{dt} \geq 0$$

le terme d'échange est nul car la paroi est adiabatique.

ici $\frac{dS_{\text{créé}}}{dt} > 0$ car $s_s - s_e > 0$

l'évolution est bien irréversible.

4)

Appliquons conservation du débit :

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{D}_m$$

car le régime est permanent.

or

$$\dot{m}_e = \rho_e v_e S_e$$

$$\text{et } \dot{m}_s = \rho_s v_s S_s$$

d'où

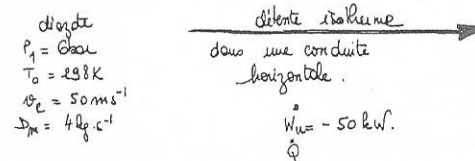
$$S_e = \frac{\dot{m}_e}{\rho_e v_e}$$

$$\text{et } S_s = \frac{\dot{m}_s}{\rho_s v_s}$$

A.N. : $S_e = 2,10^{-3} \text{ m}^2 = 20 \text{ cm}^2$

$$S_s = 6,10^{-3} \text{ m}^2 = 60 \text{ cm}^2.$$

Exercice 6:



1) Le 1^{er} principe s'écrit pour le dioxyde en écoulement :

$$\left(\frac{1}{2} \rho v_s^2 + h_s \right) \dot{m}_s - \left(\frac{1}{2} \rho v_e^2 + h_e \right) \dot{m}_e = \dot{W}_u + \dot{Q}$$

d'où $\dot{Q} = \left[\frac{1}{2} (\rho v_s^2 - \rho v_e^2) + C_p (T_s - T_e) \right] \dot{m}_s - \dot{W}_u$

or $T_e = T_s = T_0$

$$\dot{Q} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_s^2 - v_e^2) - \dot{W}_u$$

A.N. $\dot{Q} = 0,5 \times 4 \times (150^2 - 50^2) + 50 \times 10^3 = 90 \text{ kW.}$

le gaz reçoit 90 kJ sous forme de chaleur pendant 1 s.

2)

$$s_s - s_e = c_p \ln \frac{T_s}{T_e} - \frac{R}{M} \ln \frac{p_s}{p_e} = - \frac{R}{M} \ln \frac{p_s}{p_e}$$

car le dioxyde est considéré parfait.

le 2^d principe s'écrit ici $\dot{m} (s_s - s_e) = \frac{dS_{\text{créé}}}{dt} \geq 0$

$$\frac{dS_{\text{créé}}}{dt} = \dot{m} (s_s - s_e) - \frac{\dot{Q}}{T_0} = 1,204 - \frac{90 \times 10^3}{298} = 1,204 - 301,67 = -299,47 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

A.N. $\Delta s = 326 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour $m = 4 \text{ kg}$ de dioxyde
 $\Delta S = 1304 \text{ J.K}^{-1}$

$\frac{dS_{\text{créé}}}{dt} > 0$ la détente est irréversible.

Exercice 7:

état 1 $\xrightarrow{\text{compresseur}}$ état 2

$P_1 = 1 \text{ bar}$ $P_2 = 6 \text{ bar}$
 $T_1 = 300 \text{ K}$ $T_2 = ?$
 $\dot{m} = 6,5 \text{ g.s}^{-1}$ $\dot{W}_u = 1,5 \text{ kW}$

1) on applique le 1^{er} principe au système air dans le compresseur
 en écoulement stationnaire, en négligeant les variations d'énergie cinétique et potentielle,
 on obtient:

$$(h_2 - h_1) \dot{m} = \dot{W}_u + \dot{Q} \quad \text{ou } \dot{Q} = 0$$

$$C_p (T_2 - T_1) \dot{m} = \dot{W}_u \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{\dot{W}_u}{\dot{m} C_p}$$

$$T_2 = 300 + \frac{1,5 \cdot 10^3}{10^{-3} \cdot 6,5 \cdot 10^{-3}} = 531 \text{ K}$$

ou $\frac{R}{H} = \frac{\gamma-1}{\gamma} C_p$!

2) $\Delta s = s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - \frac{R}{H} \ln \frac{P_2}{P_1} = 10^3 \ln \frac{531}{300} - \frac{8,31}{28,10^{-3}} \ln \frac{6}{1} = 57,5 \text{ J.K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$

ou $\dot{m} (s_2 - s_1) = \frac{\dot{S}_{\text{géné}}}{dt} \Rightarrow \frac{\dot{S}_{\text{géné}}}{dt} = 0,374 \text{ J.K}^{-1} \text{ s}^{-1}$

3) si l'évolution était isentropique on aurait $s_2 = s_1 \Leftrightarrow P_1^{-1/\gamma} T_1^\gamma = P_2^{-1/\gamma} T_2^\gamma$

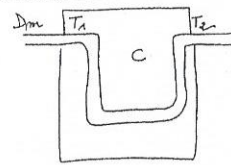
$$T_2' = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 500 \text{ K}$$

le 1^{er} principe s'écrit: $\dot{m} C_p (T_2' - T_1) = \dot{W}_u$

d'où $\dot{m} = \frac{\dot{W}_u}{C_p (T_2' - T_1)}$

$$\dot{m} = \frac{1,5 \cdot 10^3}{10^3 \cdot (500 - 300)} = 7,5 \text{ g.s}^{-1}$$

Exercice 8:



1) - le courant gazeux est interrompu donc système = calorimètre + ses accessoires $\Rightarrow$ système fermé
 le 1^{er} principe s'écrit pour ce système ouvert pendant dt:

$$dU = dH = C dT = \underbrace{\delta Q_H}_{\delta Q_P} dt = -k (T - T_0) dt \quad \left(\begin{array}{l} \delta Q_P < 0 \text{ si } T > T_0 \\ \delta Q_P > 0 \text{ si } T < T_0 \end{array} \right)$$

$$C dT = -k (T - T_0) dt$$

$$\frac{dT}{T - T_0} = -\frac{k}{C} dt$$

entre 2 instants, initial ($t=0$ et T_2) et quelconque (t, T):

$$\int_{T_2}^T \frac{dT}{T - T_0} = -\frac{k}{C} \int_0^t dt = -\frac{k}{C} t_0$$

$$\ln \left(\frac{T - T_0}{T_2 - T_0} \right) = -\frac{kt}{C} \Rightarrow \ln(T - T_0) = \ln(T_2 - T_0) - \frac{kt}{C}$$

$$T - T_0 = (T_2 - T_0) \exp \left(-\frac{kt}{C} \right)$$

$$T = T_0 + (T_2 - T_0) \exp \left(-\frac{kt}{C} \right)$$

2) Dans le cas où le courant gazeux circule, le 1^{er} principe appliqué au système ouvert gaz dans la calorimètre
 ou écoulement est pendant dt:

$$dE_{\text{cal}} (h_2 \delta m_2 - h_1 \delta m_1) = \delta W_u + \delta Q = -k (T - T_0) dt \quad \text{ou } dE_{\text{cal}} = dU_{\text{cal}}$$

En régime stationnaire, $T_{\text{cal}} = T_2$ et $dE_{\text{cal}} = 0$:

$$0 + C_p (T_2 - T_1) \dot{m} dt = -k (T_2 - T_0) dt$$

$$\text{soit } C_p \dot{m} (T_2 - T_1) = \underbrace{-k (T_2 - T_0)}_{\dot{Q}}$$

où dE_{cal} est la variation d'énergie du calorimètre
 Or la petite masse de gaz entrant pendant dt et δm_1 sortante δm_2 car il n'y a pas accumulation de gaz: le régime est stationnaire.

$$C_p = \frac{-k (T_2 - T_0)}{\dot{m} (T_2 - T_1)}$$

3) on a vu: $T = T_0 + (T_2 - T_0) \exp \left(-\frac{kt}{C} \right) \Rightarrow k = -\frac{C}{t} \ln \left(\frac{T - T_0}{T_2 - T_0} \right)$

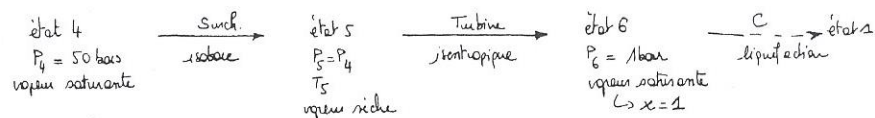
$T = T_2$ et peu $t = 600 \text{ s}$

donc $k = -\frac{C}{t} \ln \left(\frac{T_2 - T_0}{T_2 - T_0} \right) = -\frac{4 \cdot 10^3}{600} \ln \left(\frac{310 - 293}{310 - 293} \right) = 0,834 \text{ J.K}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Alors $C_p = \frac{k (T_2 - T_0)}{\dot{m} (T_2 - T_1)} = \frac{479 \text{ J.K}^{-1} \text{ s}^{-1}}{7,5 \text{ g.s}^{-1} (531 - 300)} = 479 \text{ J.K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$

Exercice 9:

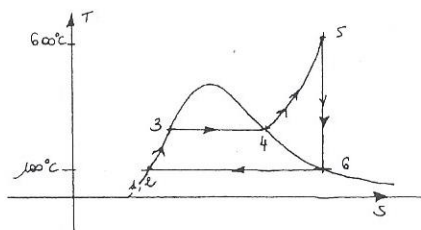
1) - le chauffe-eau chauffe la vapeur à pression constante:



on trace le point 5 en utilisant le diagramme de Mollier, car la transformation 5-6 est isentropique. On trace la droite verticale à partir de l'état 6 ($P_6 = 1 \text{ bar}$, $x=1$). Le point 5 est à l'intersection de cette droite et de l'isobare 50 bars.

La température vaut au point 5: $T_5 = 610^\circ\text{C}$.

2) -



1-2: isentropique et comme le fluide est incompressible, la variation de température durant la compression est négligeable. 1 et 2 sont confondus.

2-3: peut être représentée sur la courbe de saturation car le fluide est incompressible.

3-4: vaporisation (isotherme, isobare)

4-5: augmentation de température, isobare (vapeur sèche)

5-6: isentropique (vapeur sèche).

6-1: liquéfaction (isotherme, isobare).

3) Pour chaque élément de la machine, le 1^{er} principe s'écrit:

$$[e_{c, \text{moy}} + e_{p, \text{ext}} + h]_a^s = w_u + q \quad (\text{massiques!}) \quad \text{car } ds = \frac{dw}{T} = 0 \quad \text{donc } dh = \frac{dw}{T} + d(Pv) = v dp.$$

• pour la pompe (1-2): $w_p = h_2 - h_1 = v_2 (P_2 - P_1) = 10^{-3} (50 - 1) \cdot 10^5 = 4,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (négligeable! durant w_p)

• pour le générateur de vapeur: $q_{GV} = h_4 - h_2 = (h_4 - h_3) + (h_3 - h_2) = L_v(T_3) + c_p(T_3 - T_2)$.

T_3 est lue par extrapolation sur le diagramme de Mollier à l'intersection de l'isobare 50 bars et l'isotherme $x=1$. $\Rightarrow T_3 = 275\text{K}$

$$\text{d'oi } q_{GV} = 1641 + 4,45 (275 - 100) = 2420 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

• pour le chauffe-eau: $q_s = h_5 - h_4 = 3750 - 2810 = 890 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

lues sur le diagramme de Mollier (h en ordonnée!)

• pour la turbine: $w_T = h_5 - h_6 = 2675 - 2700 = -1025 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

lu sur le diagramme

• pour le condenseur: $q_c = -L_v(1 \text{ bar}) = -2256 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Le rendement correspond au travail total échangé sur un cycle rapporté à la somme des transferts thermiques effectivement reçus par le fluide:

$$\eta = \frac{|w_p + w_T|}{q_{GV} + q_s} \approx \frac{|w_T|}{q_{GV} + q_s} = \frac{1025}{2420 + 890} = 31\%$$