

P8 - Thermodynamique industrielle - TD

Corrigé

Exercice 1 Moteur ou récepteur ?

1) En utilisant le second principe massique sous forme élémentaire dans le cas réversible, $\delta q = T dS$ donc $q = \int_{\text{cycle}} T dS = A_{\text{cycle}}$ dans le diagramme (T,s)

2) A gauche : $A_{\text{cycle}} < 0$ donc $q_{\text{cycle}} < 0$ et $w_{\text{cycle}} > 0$ (car $q_{\text{cycle}} + w_{\text{cycle}} = 0$), cycle récepteur

A droite : $A_{\text{cycle}} > 0$ donc $q_{\text{cycle}} > 0$ et $w_{\text{cycle}} < 0$, cycle moteur

3) A gauche, $q_c < 0$ (étape 3-4) et $q_f > 0$ (étape 1-2)

A droite, $q_c > 0$ (étape 2-3) et $q_f < 0$ (étape 4-1)

Exercice 2 Détente de Joule-Thomson

1) $\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_{pp} = w_i + q$

Vitesse négligeable donc $\Delta e_c \approx 0$, canalisation horizontale donc $\Delta e_{pp} \approx 0$, pas de pièces mobiles donc $w_i = 0$, canalisation calorifugée donc $q = 0$, on en déduit $\Delta h = 0$, pas de variation d'enthalpie massique, d'où le terme "isenthalpique"

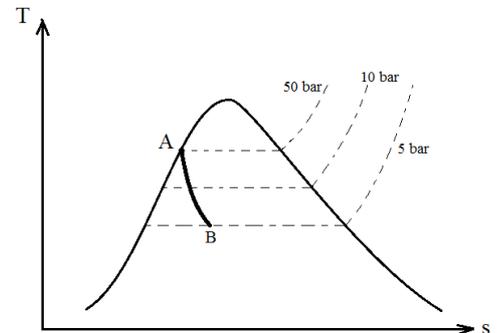
2.a) $\Delta h = c_p \Delta T$, $\Delta h = 0$ ici donc $\Delta T = 0$, on a $T_s = T_e$

2.b) Avec l'expression fournie, on obtient $\Delta s = \frac{-R}{M} \ln \left(\frac{P_s}{P_e} \right) > 0$ car $P_s < P_e$

2.c) Le second principe industriel s'écrit $\Delta s = s_{\text{éch}} + s_{\text{cr}} = 0 + s_{\text{cr}}$ (adiabatique), donc $s_{\text{cr}} > 0$, la détente de Joule-Thomson est irréversible

3.a) voir ci-contre, le fluide est sous forme de mélange liquide-vapeur

3.b) On a graphiquement $\Delta s > 0$, et $\Delta s = s_{\text{éch}} + s_{\text{cr}} = 0 + s_{\text{cr}}$ donc $s_{\text{cr}} > 0$, irréversible



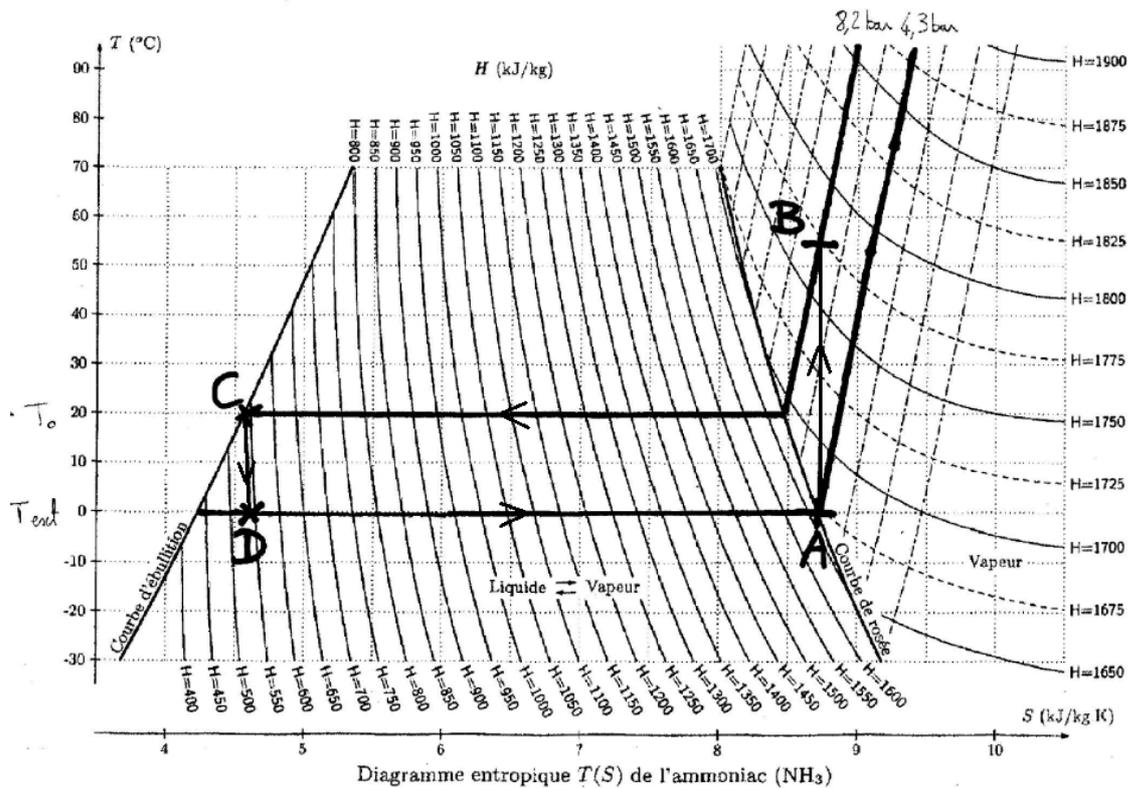
Exercice 3 Convecteur dans un chauffage central

1) $\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_{pp} = w_i + q$ avec $\Delta e_c = 0$, Δe_{pp} négligeable (sinon on peut prendre en compte $g \Delta z$ avec $\Delta z \approx -1 \text{ m}$), $w_i = 0$ (pas de pièces mobiles)

Finalement $q = \Delta h = c \Delta T = -126 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

2) $P_{th} = D_m \cdot q = \mu_{\text{eau}} D_v \cdot q = -1,05 \cdot 10^3 \text{ W}$ est reçue par l'eau donc $P_{ch} = +1,05 \cdot 10^3 \text{ W}$ est reçue par l'air (1 kW, ordre de grandeur raisonnable pour un convecteur)

Exercice 4 Etude d'une pompe à chaleur



1) Voir diagramme pour les isobares (en traits épais)

2) $\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_{pp} = w_i + q$ appliqué au détendeur :

$$w_{i,CD} = 0 \text{ (pas de pièces mobiles)}, q_{CD} = 0 \text{ (calorifugé)}, \Delta e_{pp} \sim \Delta e_c \sim 0 \Rightarrow \Delta h = h_d - h_c = 0 \Rightarrow h_D = h_C$$

$\Delta s = s_{éch} + s_{cr}$ appliqué au compresseur :

$$s_{éch} = 0 \text{ (adiabatique)}, s_{cr} = 0 \text{ (fonctionnement réversible)} \Rightarrow \Delta s = s_B - s_A = 0 \Rightarrow s_A = s_B$$

3) On place A et C en premier (vapeur saturante et liquide saturant dont on connaît la pression)

AB est isentropique (segment vertical) et BC est isobare, on peut ainsi placer B

CD est isenthalpique (courbe isenthalpe) et DA est isobare, on peut placer D

On lit $T_B = 55^\circ\text{C}$

4) $A \Rightarrow B$ (compresseur) : $\Delta h = w_i + q$ avec $q = 0$ et $w_i = w_{i,C} \Rightarrow w_{i,C} = h_B - h_A$

$$\text{Graphiquement } h_B = 1775 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad h_A = 1670 \text{ kJ.kg}^{-1} \Rightarrow w_{i,C} = 1,0 \cdot 10^2 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$B \Rightarrow C$ (E_1) : $\Delta h = w_i + q$ avec $w_i = 0$ et $q = q_1 \Rightarrow q_1 = h_C - h_B$

$$\text{Graphiquement } h_C = 540 \text{ kJ.kg}^{-1} \Rightarrow q_1 = -1,23 \cdot 10^3 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$D \Rightarrow A$ (E_2) : $\Delta h = w_i + q$ avec $w_i = 0$ et $q = q_2 \Rightarrow q_2 = h_A - h_D$

$$h_D = h_C = 540 \text{ kJ.kg}^{-1} \Rightarrow q_2 = 1,13 \cdot 10^3 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

On a $w_C + q_1 + q_2 = 0$ (on aurait pu le prévoir, car $\Delta h = 0$ sur un cycle).

$$5) \text{ COP}_{\text{chauffage}} = \frac{-q_c}{w_i} = \frac{-q_1}{w_{i,C}} = \frac{1,23 \cdot 10^3}{1,0 \cdot 10^2} = 12,3$$

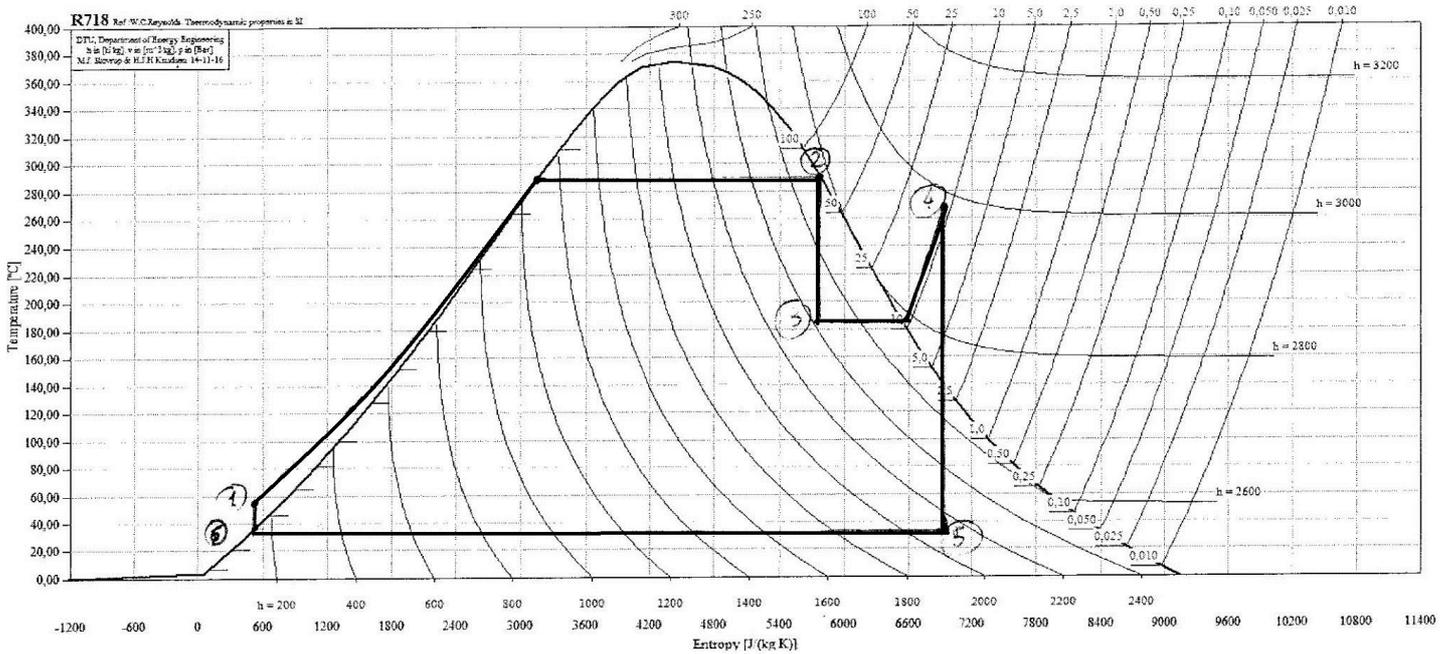
Pour un radiateur, $\frac{P_{\text{thermique}}}{P_{\text{élec}}} = 1$ (toute la puissance électrique est dissipée par effet Joule).

L'inconvénient des PAC est le coût de l'investissement initial et de la maintenance.

P8 - Thermodynamique industrielle - TD

Corrigé

Exercice 5 Etude du circuit secondaire d'une centrale nucléaire



2)

	P (bar)	T (°C)	s (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	h (kJ.kg ⁻¹)	x _v
2	74	290	5,8877	2786	1
3	11	185	5,8877	2476	0,8469
4	11	267	7,0123	2859	—
5	0,05	35	7,0123	2152	0,8293
6	0,05	35	0,5049	146,6	0

Au point 3 $s_3 = s_2$ (2 → 3 isentropique)

$$x_{v(3)} = \frac{s_3 - s_L(185^\circ\text{C})}{s_U(185^\circ\text{C}) - s_L(185^\circ\text{C})} = \frac{5,8877 - 2,1876}{6,5565 - 2,1876} = \underline{\underline{0,8469}}$$

ou $x_{v(3)} = \frac{h_3 - h_L}{h_U - h_L}$ donc $h_3 = h_L(185^\circ\text{C}) + x_v(h_U(185^\circ\text{C}) - h_L(185^\circ\text{C}))$

$$h_3 = 785,2 + 0,8469(2782 - 785,2) = \underline{\underline{2476}} \text{ kJ.kg}^{-1}$$

On obtient de même $x_{v(5)} = \frac{7,0123 - 0,5049}{8,3519 - 0,5049} = \underline{\underline{0,8293}}$

et $h_5 = 146,6 + 0,8293 \times (2565 - 146,6) = \underline{\underline{2152}} \text{ kJ.kg}^{-1}$

3) On a $x_L = 1 - x_v$ donc $x_{L(3)} = 0,1531$ et $x_{L(5)} = 0,1707$
 Ces valeurs dépassent légèrement la limite (0,15)

4) En absence de surchauffe, on aurait $s_5 = s_2$ donc $x_{v(5)} = \frac{5,8877 - 0,5049}{8,3519 - 0,5049} = 0,6860$
 on aurait $x_L = 0,3140$ 31,4% de liquide. Sans la surchauffe, le risque de corrosion est important.

P8 - Thermodynamique industrielle - TD
Corrigé

Exercice 6 Tuyère

- 1) $C_p - C_v = nR$ et $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, on en déduit $C_p = \frac{\gamma nR}{\gamma - 1}$
- 2) $c_p = \frac{C_p}{m} = \frac{\gamma R}{(\gamma - 1)M} = 9,7 \cdot 10^2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $\Delta h = c_p \Delta T = c_p (T_s - T_e) = -9,2 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (refroidissement)
- 3) $\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_{pp} = w_i + q$
 $\Delta e_{pp} = 0$ (tuyère horizontale), $w_i = 0$ (sans pièces mobiles), $q = 0$ (calorifugée) \Rightarrow on obtient $\Delta h + \Delta e_c = 0$
 $\frac{1}{2}v_s^2 - \frac{1}{2}v_e^2 = -\Delta h$ or v_e est négligeable donc $v_s = \sqrt{-2\Delta h} = 1,4 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- 4) Transformation adiabatique et réversible d'un gaz parfait : on peut appliquer les lois de Laplace :
 $PV^\gamma = \text{cste} \Rightarrow P^{1-\gamma}T^\gamma = \text{cste}$ donc $P_e^{1-\gamma}T_e^\gamma = P_s^{1-\gamma}T_s^\gamma$ d'où $P_e = P_s \left(\frac{T_s}{T_e}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = 22 \text{ bar}$
- 5) Le raisonnement est visiblement faux car on a $v_s \gg v_e$. Ce raisonnement utilise (sans le dire) l'hypothèse d'un fluide incompressible : il faut que le débit volumique $S \cdot v$ se conserve pour faire un lien direct entre la section de l'écoulement (écartement ou rapprochement des lignes) et la vitesse du fluide. Ce n'est pas le cas ici, seul le débit volumique se conserve, car le gaz est compressible.

Exercice 7 Compresseur

- 1) Transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait : $PV^\gamma = \text{cste} \Rightarrow P^{1-\gamma}T^\gamma = \text{cste}$
 $T_{1,\text{rév}} = T_0 \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 541 \text{ K}$
- 2) $\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_{pp} = w_i + q$ avec $\Delta e_{pp} = 0$ (écoulement horizontal), $\Delta e_c = 0$, $q = 0$ (calorifugé)
On obtient $w_{i,\text{rév}} = \Delta h = c_p (T_{1,\text{rév}} - T_0) = 2,6 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
- 3) On a en réalité $w_{i,\text{réel}} = \Delta h = c_p (T_{1,\text{réelle}} - T_0)$ avec $w_{i,\text{réel}} = 0,80 w_{i,\text{rév}} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
On obtient alors $T_{1,\text{réelle}} = T_0 + (w_{i,\text{réel}} / c_p) = 488 \text{ K}$
- 4) $\mathcal{P}_i = D_m w_{i,\text{réel}} = 1,0 \cdot 10^7 \text{ W} = 10 \text{ MW}$
- 5) Le débit massique est le même dans tout l'écoulement (stationnaire), alors que le débit volumique n'est pas conservé (le fluide étudié n'est pas incompressible).

P8 - Thermodynamique industrielle - TD
Corrigé

Exercice 8 Propulseur à eau oxygénée

a. $\Delta_r H^0 = -2 \cdot \Delta_f H^0(H_2O_{2(g)}) + 2 \cdot \Delta_f H^0(H_2O_{(g)}) + \Delta_f H^0(O_{2(g)}) = -2 \cdot (-187) + 2 \cdot (-285) + 0 = -196 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

b.

	$2 \text{ H}_2\text{O}_{2(l)}$	=	$2 \text{ H}_2\text{O}_{(g)}$	+	$\text{O}_{2(g)}$
EI	1		0		0
EF	$1 - 2 x_F$		$2 x_F$		x_F

On en déduit $x_F = x_{\max} = 0,5 \text{ mol}$.

c. Pour la décomposition d'une mole de H_2O_2 , le milieu réactionnel reçoit $Q = x_f \Delta_r H^0 = -98 \text{ kJ}$. Le transfert thermique molaire **fourni par la réaction** vaut donc $Q_m = +98 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (attention au signe).

Le transfert thermique massique fourni par la réaction vaut donc $q = 2,9 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

d. Le catalyseur permet d'augmenter la vitesse de réaction. Sans catalyseur, la réaction serait lente, le débit de gaz serait faible et la ceinture fusée ne pourrait pas assurer la propulsion.

e. $\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p = w_i + q$, ici on a $\Delta h + \Delta e_c = 0$ et on sait que $T_s < T_e$ (refroidissement des gaz) donc $h_s < h_e$ donc $\Delta h < 0$, on en déduit $\Delta e_c > 0$, le passage des gaz dans la tuyère provoque leur accélération.

f. $\Delta h + \Delta e_c = 0$ et $\Delta e_c = \frac{1}{2} v_s^2 - \frac{1}{2} v_e^2 \approx \frac{1}{2} v_s^2$ (on néglige l'énergie cinétique des gaz en entrée)

donc $v_{\text{gaz}, \max} = \sqrt{2 \Delta h} = \sqrt{2 c_p (T_s - T_e)}$

g. En raisonnant sur la décomposition d'une mole de H_2O_2 , la réaction forme 1 mol de H_2O et 0,5 mol de O_2 , on a donc $C_p = 1 \cdot C_p^0(\text{H}_2\text{O}) + 0,5 \cdot C_p^0(\text{O}_2) = 79,3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

La masse de gaz correspondante vaut $m = 1 \cdot M(\text{H}_2\text{O}) + 0,5 \cdot M(\text{O}_2) = 34 \text{ g}$

On en déduit la capacité thermique massique du gaz qui traverse la tuyère $c_p = C_p/m = 2,3 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

Finalement $v_{\text{gaz}, \max} = 2,1 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

h. L'énergie recherchée (utile) est l'énergie cinétique massique $e_c = \frac{1}{2} v_{\text{gaz}}^2$ qui permet d'assurer la propulsion.

L'énergie coûteuse est le transfert thermique massique q fourni par la réaction (le réactif H_2O_2 a un coût), d'où

l'expression du rendement $\eta = \frac{v_{\text{gaz}}^2}{2q}$

Numériquement, $\eta_{\max} = 76\%$, il s'agit d'un bon rendement (*difficile de faire d'autres commentaires, on ne sait pas avec quelles hypothèses les valeurs de T_e et T_s ont été obtenues*).

i. Les **deux bouteilles** (volume total $V = 2 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}_2}$) sont vidées pendant une durée $\Delta t = 21,0 \text{ s}$, donc le débit

volumique vaut $D_V = \frac{2 \times 19 \cdot 10^{-3}}{21,0} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ puis $D_m = \mu_{\text{H}_2\text{O}_2} D_V = 2,6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

On peut utiliser cette valeur pour calculer la puissance thermique fournie par la réaction,

$P_{th} = D_m q = 7,5 \cdot 10^6 \text{ W}$ soit 7,5 MW.

j. $\eta_{\text{réel}} = \frac{P}{P_{th}} = \frac{1,1 \cdot 10^6}{7,5 \cdot 10^6} = 0,15$ soit 15%, on a donc $\eta_{\text{réel}} < \eta_{\max}$. On peut l'expliquer : la tuyère n'est pas

parfaitement calorifugée, une partie de l'énergie libérée par la réaction est perdue par transfert thermique avec l'extérieur.