TD 23 (Chap. 22) – Machines thermiques

I Questions de cours

II Applications directes du cours

App1 Machines monothermes

Le système est un moteur si $W < 0$.

- Bilan d'énergie interne sur un cycle $\Delta U = W + Q = 0 \Rightarrow Q = -W > 0$.
- Inégalité de Clausius $Q/T_0 \leq 0$.

Contradiction !

App2 Travail d'un cycle

On peut montrer que dans le diagramme de Watt, le travail sur un cycle s'identifie à l'opposé de l'aire du cycle. Pour un diagramme de Clapeyron c'est le travail massique.

App3 Échauffement sans fournir de travail

Le bilan d'énergie interne sur un cycle s'écrit $\Delta U = Q_1+Q_2+Q_3 = 0$, l'inégalité de Clausius s'écrit $Q_1/T_1+Q_2/T_2+Q_3/T_3 = 0$. Grâce à ces deux relations, on trouve

$$Q_2 \geq Q_1\frac{T_2}{T_1}\frac{T_3-T_1}{T_2-T_3} > 0\ ;\ Q_3 \leq -Q_1\frac{T_3}{T_1}\frac{T_2-T_1}{T_2-T_3} < 0\,.$$

Une pompe à chaleur tritherme sans travail est possible en prélevant de l'énergie à la source de température intermédiaire et en cédant de l'énergie aux sources chaude et froide.

App4 Rendement de machines dithermes

1. $W < 0$, $Q_f < 0$, $Q_c > 0$ et $\eta = \dfrac{-W}{Q_c} \leq 1 - \dfrac{T_f}{T_c}$.

2. $W > 0$, $Q_f > 0$, $Q_c < 0$ et $e = \dfrac{Q_f}{W} \leq \dfrac{T_f}{T_c - T_f}$.

3. $W > 0$, $Q_f > 0$, $Q_c < 0$ et $e = \dfrac{-Q_c}{W} \leq \dfrac{T_c}{T_c - T_f}$.

App5 Rendement

1. Système : eau de la cuve (liquide, vapeur), source chaude : combustible nucléaire ($Q_C > 0$), source froide : atmosphère/système de refroidissement ($Q_F < 0$), travail de la vapeur d'eau sur la turbine ($W < 0$). $\eta_C = \dfrac{-W}{Q_C} = 1 + \dfrac{Q_F}{Q_C} = 1-\dfrac{T_F}{T_C} \simeq 0.66$. En réalité beaucoup moins et il faut prendre en compte le rendement de la turbine, les pertes lors de l'écoulement de la vapeur... $\eta \simeq 0.3$.

2. $\eta_C = 1 - \dfrac{T_F}{T_C} \simeq 0.9$. En réalité beaucoup moins à cause des pertes... $\eta \simeq 0.35$.

App6 Efficacité de Carnot de machines frigorifiques

1. Source chaude : extérieur $T_C = 300\,\mathrm{K}$, source froide : intérieur du réfrigérateur $T_F = 280\,\mathrm{K}$ alors $\eta_C = \dfrac{Q_F}{W} = \dfrac{Q_F}{-Q_F - Q_C} = \dfrac{T_F}{T_C - T_F} \simeq 14$.

2. Source chaude : extérieur $T_C = 310\,\mathrm{K}$, source froide : maison $T_F = 295\,\mathrm{K}$ alors $\eta_C = \dfrac{T_F}{T_C - T_F} \simeq 20$.

3. $\eta_C = \dfrac{-Q_C}{W} = \dfrac{-Q_C}{-Q_C - Q_F} = \dfrac{1}{1-\frac{T_F}{T_C}} = \dfrac{T_C}{T_C - T_F} \simeq 11\,\mathrm{K}$.

App7 Panne de climatiseur

Lors du fonctionnement cyclique d'une machine thermique,

- bilan d'énergie interne $\Delta U = W + Q_F + Q_C = 0$;
- inégalité de Carnot–Clausius on a $\dfrac{Q_F}{T_F} + \dfrac{Q_C}{T_C} < 0$.

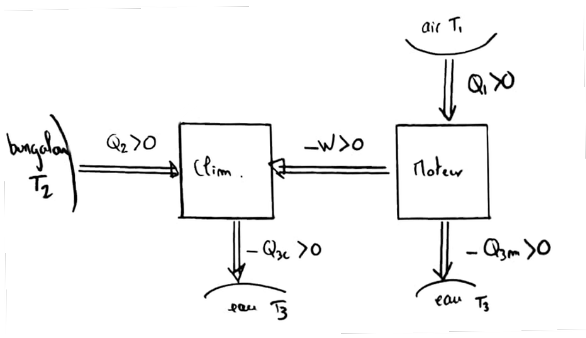
De plus pour une machine frigorifique $W > 0$, $Q_F > 0$ et $Q_C < 0$. L'inégalité de Clausius permet d'écrire

$$-Q_C > Q_F\frac{T_C}{T_F} = Q_F\,.$$

Si le réfrigérateur est ouvert source chaude et froide se confondent et $T_F = T_C$. On constate dans ce cas que le transfert thermique sortant (transfert vers la "source chaude") est plus élevé que le transfert thermique entrant (transfert depuis la "source froide")... Ainsi l'extérieur reçoit de l'énergie sous forme thermique et la température augmente !

III Exercices

Ex1 Couplage moteur–climatiseur



- Bilan d'énergie appliqué au moteur sur un cycle : $W + Q_1 + Q_{3m} = 0$ avec W le travail reçu par le moteur et Q_{3m} la chaleur reçue par le moteur de la part du lac.
- (In)égalité de Clausius appliquée au moteur : $Q_1/T_1 + Q_{3m}/T_3 = 0$.

Ainsi on peut écrire la chaleur reçue par le moteur de la part de l'air comme

$$Q_1 = -W - Q_{3m} = -W + \frac{T_3}{T_1}Q_1 \Rightarrow Q_1 = \frac{T_1}{T_3 - T_1}W \; .$$

- Bilan d'énergie appliqué au climatiseur sur un cycle : $-W + Q_2 + Q_{3c} = 0$ avec $-W$ le travail reçu par le climatiseur (de la part du moteur) et Q_{3c} la chaleur reçue par le climatiseur de la part du lac.
- (In)égalité de Clausius appliquée au climatiseur : $Q_2/T_2 + Q_{3c}/T_3 = 0$.

Ainsi on peut écrire la chaleur reçue par le moteur de la part de l'air comme

$$Q_2 = W + Q_{3c} = W + \frac{T_3}{T_2}Q_2 \Rightarrow Q_2 = \frac{T_2}{T_2 - T_3}W \; .$$

Alors l'efficacité s'écrit

$$e = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}\frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_3} \; .$$

Ex2 Moteur Diesel 1

	A	B	C	D
p en bar	1,00	44,3	44,3	1,76
T en K	323	954	1431	516
V en L	2,40	0,16	0,24	0,24

1. Lors de la transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait la loi de Laplace est vérifiée

$$pV^\gamma = \text{cste} \Rightarrow p^{1-\gamma}T^\gamma = \text{cste} \; ;$$

alors on a $p_B = p_A \left(\frac{T_A}{T_B}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \simeq 44.3\,\text{bar}$ et $V_B = V_A \left(\frac{p_A}{p_B}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \simeq 0.16\,\text{L}$.

BC étant isobare $p_C = p_B$ et donc (d'après l'équation d'état du gaz parfait)

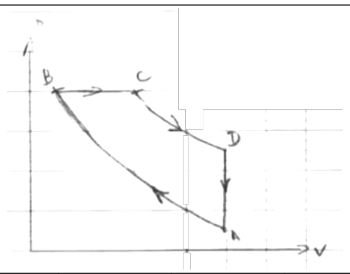
$$\frac{nRT_B}{V_B} = p_B = p_C = \frac{nRT_C}{V_C} \Rightarrow T_C = T_B\frac{V_C}{V_B} \simeq 1431\,\text{K} \; .$$

CD étant une transformation adiabatique réversible, on a pour un gaz parfait

$$p_D = p_C\left(\frac{V_C}{V_D}\right)^\gamma \simeq 1.76\,\text{bar} \; .$$

DA étant isochore $V_A = V_D$ et $\frac{nRT_A}{p_A} = V_A = V_D = \frac{nRT_D}{p_D}$ donc

$$T_D = T_A\frac{p_D}{p_A} \simeq 516\,\text{K} \; .$$



	W	ΔU	Q
AB	1175 J	1175 J	0 J
BC	-355 J	887 J	1242 J
CD	-1605 J	-1605 J	0 J
DA	0 J	-455 J	-455 J
Cycle	-785 J	0 J	785 J

2.

– Transformation AB :

$$W_{AB} = \Delta U = U_B - U_A = C_v(T_B - T_A) = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_B - T_A) \simeq 1175\,\mathrm{J}$$

– Transformation BC :

$$W_{BC} = -p_B(V_C - V_B) \simeq -355\,\mathrm{J}$$

$$\Delta U = U_C - U_B = C_v(T_C - T_B) \simeq 887\,\mathrm{J}$$

– Transformation CD :

$$W_{CD} = \Delta U = U_D - U_C = C_v(T_D - T_C) = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_D - T_C) \simeq -1605\,\mathrm{J}$$

– Transformation DA :

$$W_{DA} = 0$$

$$\Delta U = U_A - U_D = C_v(T_A - T_D) = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_A - T_D) \simeq -455\,\mathrm{J}$$

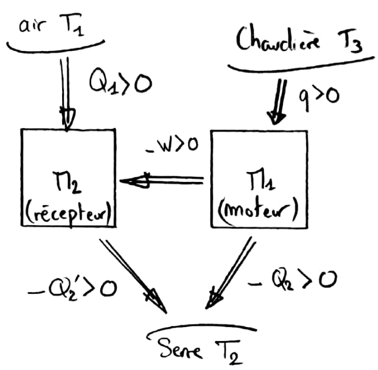
Pour trouver les transferts thermiques on utilise l'expression du bilan d'énergie interne $\Delta U = W + Q$.

3. Le rendement d'un moteur se définit comme $\eta = \dfrac{-W}{Q} = 0,63$. Le rendement maximal de ce moteur correspond au rendement de Carnot (i.e. de la machine réversible correspondante). Pour obtenir son expression on écrit un bilan d'énergie interne sur un cycle et l'inégalité (qui devient une égalité dans le cas réversible) de Clausius. Et on obtient (cf cours) :

$$\eta_c = 1 - \frac{T_A}{T_C} \simeq 0,77\ .$$

Ex3 Un dispositif thermodynamiquement avantageux

1.



2. En supposant la chaudière comme parfaite et en régime permanent, la chaleur q reçue par cette dernière est transmise intégralement au moteur. Réalisons un bilan d'énergie sur un cycle du moteur $\Delta U = W + q + Q_2 = 0$ et écrivons l'égalité de Clausius $q/T_3 + Q_2/T_2 = 0$ ainsi on obtient l'expression du travail échangé entre les deux machines thermiques :

$$W = q\frac{T_2 - T_3}{T_3}\ .$$

3. Faisons de même sur le récepteur alors $\Delta U = -W + Q_1 + Q_2' $ et $Q_1/T_1 + Q_2'/T_2 = 0$ ainsi on obtient

$$Q_2' = W - Q_1 = W + Q_2'\frac{T_1}{T_2} \Rightarrow Q_2' = W\frac{T_2}{T_2 - T_1} = q\frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_1}\frac{T_2}{T_3}\ .$$

La chaleur totale reçu par la serre est

$$-Q_2 - Q_2' = q\frac{T_2}{T_3} + q\frac{T_3 - T_2}{T_2 - T_1}\frac{T_2}{T_3} = q\frac{T_2}{T_3}\frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1}\ .$$

4. Pour le chauffage direct en 24 h une masse m de charbon est consommée pour fournir une chaleur q à la serre. Dans le cas de ce dispositif thermodynamique, une masse m de charbon fournie une chaleur q à la chaudière entrainant un transfert thermique $q' = -Q_2 - Q_2' = q\dfrac{T_2}{T_3}\dfrac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1}$. On a le rapport $q'/q \simeq 3$: grâce à ce dispositif une masse m de charbon peut entraîner un transfert thermique trois fois plus important. Le transfert thermique par unité de temps est tel que la serre reste à température constante, ainsi on peut chauffer la serre 3 fois plus longtemps avec une même masse de charbon m consommée.

Ex4 Utilisation d'un moteur

1. Réalisons un bilan d'énergie sur le récepteur qui reçoit un travail $W_r > 0$, une chaleur $Q_2 >$ de la part de la source froide et une chaleur $-Q_1' < 0$ de la part de la source chaude $\Delta U = W_r + Q_2 - Q_1' = 0$ et l'égalité de Clausius $-Q_1'/T_1 + Q_2/T_2 = 0$ alors

$$W_r = Q_1' - Q_2 = Q_1' \frac{T_1 - T_2}{T_1} > 0 \ .$$

On appelle Q_1' la quantité de chaleur apportée à la source chaude. Exprimer le travail que doit fournir le moteur en fonction de Q_1', T_1, et T_2.

2. L'efficacité de la pompe à chaleur s'écrit

$$e = \frac{Q_1'}{W_r} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \simeq 13.6 \ .$$

3. Écrivons la variation d'énergie interne de la source $\Delta U_1 = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_{1,f} - T_{1,i}) = \frac{p_0 V}{T_{1,i}(\gamma - 1)}(T_{1,f} - T_{1,i}) \simeq 1.26\,\mathrm{MJ}$ or l'énergie est apportée par l'intermédiaire d'une machine thermique telle que $\Delta U_1 = Q_1' = eW_r = e\mathcal{P}\tau$ si on suppose la puissance constante alors

$$\tau = \frac{\Delta U_1}{e\mathcal{P}} \simeq 5.0\,\mathrm{s} \ .$$

4. On sait que l'efficacité de la pompe à chaleur s'écrit $e = Q_1'/W_r$ et que le rendement du moteur s'écrit $\rho = W_r/Q_c$. En l'absence des machines thermiques la chaleur reçu par la pièce de volume V n'est plus Q_1' mais $Q_c = W_r/\rho = Q_1'/e\rho$. Ainsi si l'on brule directement le combustible, l'apport d'énergie aurait été inférieure d'un facteur $e\rho$ et donc l'élévation de température également (car pour un gaz parfait $\Delta U = C_v \Delta T$) :

$$\Delta T' = \frac{\Delta T}{e\rho} \simeq 0.54\,\mathrm{K} \ .$$

5. Cette question est proche de la précédente, l'apport d'énergie serait donc cette fois de $\mathcal{P}\tau'$ et non pas $e\mathcal{P}\tau$ ainsi le temps de chauffage devient

$$\tau' = \frac{\Delta U_1}{\mathcal{P}} \simeq 68\,\mathrm{s} \ .$$

Ex5 Calcul du rendement du moteur à essence

1. Atmosphère, échappement EB.

2. Mélange air/carburant en combustion, combustion CD.

3. Voir cours...

4. EB détente isochore donc $Q_{EB} = \Delta U_{EB} = C_v(T_B - T_E)$, CD combustion isochore donc $Q_{CD} = \Delta U_{CD} = C_v(T_D - T_C)$ et le rendement devient

$$r = 1 + \frac{T_B - T_E}{T_D - T_C} \ .$$

5. Lors d'une transformation adiabatique réversible $TV^{\gamma-1}$ est constant alors

$$r = ... = 1 - \left(\frac{V_{min}}{V_{max}}\right)^{\gamma - 1} = 1 - a^{1-\gamma} \ .$$

6. Voir cours... $r = 1 - \frac{T_{Fr}}{T_{Ch}} \simeq 0.51$, il faut avoir $a = 6$ pour avoir un rendement similaire avec le moteur à essence réel (la réalisation technique influence le rendement contrairement à la machine de Carnot qui est un cas idéal).

Ex6 Moteur Diesel 2

1.

- Compression adiabaitque réversible 12 : $p_2 = p_1 \frac{V_1^\gamma}{V_2^\gamma} = p_1 a^\gamma$.
- Dilatation isobare 23 : $p_3 = p_2 = p_1 a^\gamma$.
- Détente adiabatique réversible 34 : $p_4 = p_3 \frac{V_3^\gamma}{V_4^\gamma} = p_1 \frac{a^\gamma}{b^\gamma}$.

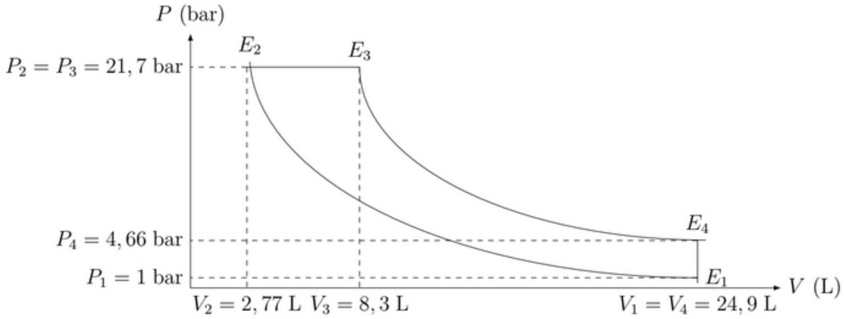
2.

- Rapport volumétrique $V_2 = \frac{V_1}{a}$.
- Refroidissement isochore 41 : $V_4 = V_1$.
- Rapport volumétrique $V_3 = \frac{V_4}{b} = \frac{V_1}{b}$.

3.

	V	p	T
État 1	24.9 L	1.0 bar	300 K
État 2	2.77 L	21.7 bar	722 K
État 3	8.31 L	21.7 bar	2.17×10^3 K
État 4	24.9 L	4.66 bar	1.40×10^3 K

4.



5.

	W	Q
12	$\Delta U_{12} = \dfrac{nR}{\gamma - 1}(T_2 - T_1) \simeq 8.77 \times 10^3$ J	0
23	$-p_2(V_3 - V_2) \simeq -12.0 \times 10^3$ J	$\Delta H_{23} = \dfrac{\gamma n R}{\gamma - 1}(T_3 - T_2) \simeq 42.1 \times 10^3$ J
34	$\Delta U_{34} = \dfrac{nR}{\gamma - 1}(T_4 - T_3) = -16.0 \times 10^3$ J	0
41	0	$\Delta U_{41} = \dfrac{nR}{\gamma - 1}(T_1 - T_4) \simeq -22.9 \times 10^3$ J

6. $r = \dfrac{-W}{Q_C} = 1 + \dfrac{Q_F}{Q_C} = 1 + \dfrac{Q_{41}}{Q_{23}}$.

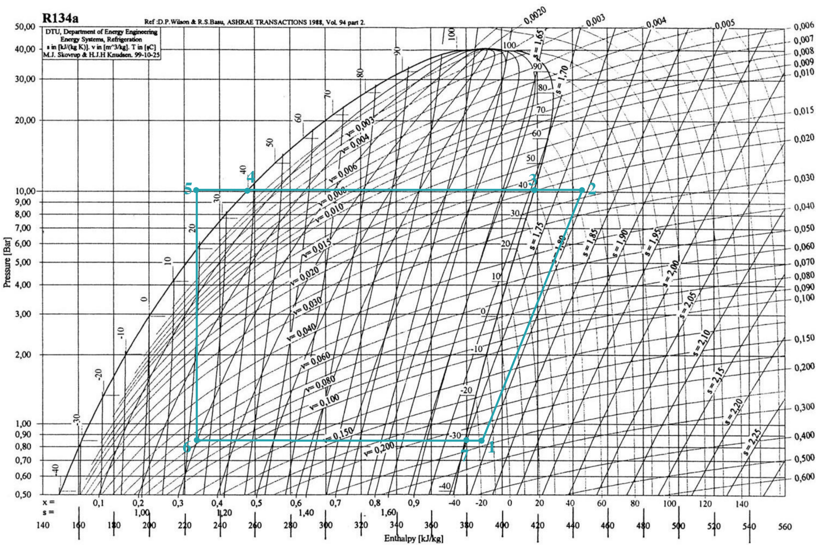
7. $r = 1 + \dfrac{T_1 - T_4}{\gamma(T_3 - T_2)} \simeq 0.457$.

8. Voir cours... $r_C = 1 - \dfrac{T_F}{T_C} = 1 - \dfrac{T_1}{T_3} \simeq 0.862$.

9. $r < r_C$ signifie que le cycle du moteur Diesel n'est pas réversible, il existe des transformations n'étant pas à l'équilibre thermique (combustion, échappement).

Ex7 Étude d'un congélateur

1.



2. $p_{vap} \simeq 0.85$ bar, $p_{cond} \simeq 10$ bar, $x_{v,6} \simeq 0.30$, $T_2 \simeq 65\,°\text{C}$ et $T_6 = -30\,°\text{C}$.

3. Transformation isobare donc $q_F = q_{671} = \Delta h_{671} \simeq 165\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$, $q_c = q_{2345} = \Delta h_{2345} \simeq -220\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$ et $w = \delta u_{cycle} - q_F - q_C = -q_F - q_C \simeq 55\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$.

4. $e = \dfrac{q_F}{w} \simeq 3.0$ et $e_C = \dfrac{T_F}{T_C - T_F} \simeq 6.7$.

Ex8 Chauffage d'un bâtiment

1. $\mathcal{P} = \dfrac{5 \times 10^6}{3600 \times 3.2} \simeq 4.3 \times 10^2$ J.

2. $\mathcal{P}_{el} = RI^2 = \dfrac{5.0 \times 10^6}{3600} \simeq 1.4 \times 10^3$ J.

3. $V = \dfrac{5.0 \times 10^6}{3.7 \times 10^7 \times 0.8} \simeq 0.17\,\mathrm{L\,h^{-1}}$.

4. $V = \dfrac{5.0 \times 10^6}{3.7 \times 10^7 \times 0.4} \times \dfrac{1}{3.2} \simeq 0.11\,\mathrm{L\,h^{-1}}$.

IV Problèmes

Pb1 Un congélateur

Considérons la transformation comme monobare avec équilibre mécanique initial et final, ainsi la variation d'enthalpie de l'eau est

$$\Delta H = Q_f = mc_l(T_{fus} - T_0) - ml_{fus} \simeq -414\,\mathrm{MJ}\ .$$

Pour estimer le coût de fonctionnement d'un tel dispositif il faut déterminer son efficacité, ici

$$e = \frac{-Q_f}{W} = ... = \frac{T_{fus}}{T_0 - T_{fus}}\ .$$

L'énergie nécessaire au fonctionnement de la machine est donc

$$W = \frac{-Q_f}{e} \simeq 30.3 \times 10^6\,\mathrm{J} \simeq 8.4\,\mathrm{kW\,h}\ .$$

Donc un coût de revient de $1,09$ euros.

Pb2 Fonctionnement d'une machine à vapeur

1. A, B : vapeur. C, D : liquide.

2. Le cycle est parcouru dans le sens anti–trigonométrique, son aire sera donc compté positivement. Ainsi le travail reçu par cette machine est négatif : il s'agit d'un moteur.

3. Bilan d'énergie sur un cycle : $\Delta U \simeq W + Q_{BC} + Q_{DA}$ tandis que l'inégalité de Clausius s'écrit $Q_{BD}/T' + Q_{DA}/T'' \leq 0$ alors on a

$$W = -Q_{BC} - Q_{DA} \geq Q_{DA}\left(-1 + \frac{T'}{T''}\right)\ .$$

Ainsi le rendement peut être majorer par

$$r = \frac{|W|}{Q_{DA}} = \frac{-W}{Q_{DA}} \leq 1 - \frac{T'}{T''} = r_c\ .$$

4. La transformation AB est une transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait, la loi de Laplace est donc vérifiée :

$$pV^\gamma = \text{cste} \Rightarrow T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{cste}\ .$$

Alors on a

$$T_A = T_B\left(\frac{p_B}{p_A}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \simeq 614\,\mathrm{K}\ .$$

Et le travail reçu lors de cette transformation

$$W_{AB} = \Delta U_{AB} = C_v(T_B - T_A) = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_B - T_A) \simeq -10\,\mathrm{kJ}\ ;$$

le système cède du travail lors de cette transformation.

5. La transformation BC est isobare donc

$$W_{BC} = -p_B(V_C - V_B) \simeq p_BV_B = nRT_B \simeq 3.1\,\mathrm{kJ}\ .$$

De plus, $\Delta U_{BC} = U_C - U_B = Q_{BC} + W_{BC} = Q_{BC} + p_BV_B - p_CV_C$ alors

$$U_C + p_CV_C - U_B - p_BV_B = H_C - H_B = \Delta H_{BC} = Q_{BC}\ .$$

La transformation BC correspond à la liquéfaction de la vapeur contenue dans la machine, ainsi

$$Q_{BC} = \Delta H_{BC} = -nL_{v,m} \simeq -46.8\,\text{kJ} \;.$$

6. La transformation DA a les mêmes propriétés que la transformation BC donc on trouve

$$W_{DA} = ... = -nRT_A \simeq -5.1\,\text{kJ} \;.$$

7. Dans le diagramme de Clapeyron, la courbe associée à la transformation CD est quasiment verticale. Alors l'aire sous la courbe (le travail massique à un signe près) est donc largement négligeable devant celle associée aux autres transformations.

8. Le bilan d'énergie interne sur un cycle s'écrit $W + Q_{BC} + Q_{DA} = 0$ de plus $W = W_{AB} + W_{BC} + W_{DA} \simeq -12\,\text{kJ}$. On a donc

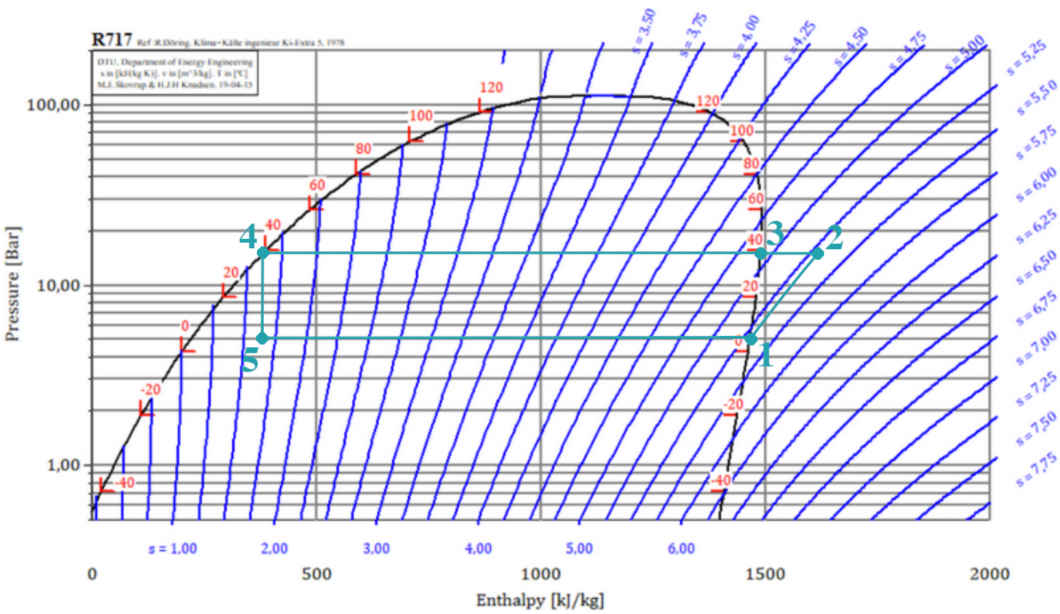
$$Q_{DA} = -Q_{BC} - W \simeq 58.8\,\text{kJ} \;.$$

Les rendement et rendement de Carnot valent donc

$$r \simeq 0,2 \;;\; r_c \simeq 0,39 \;.$$

Pb3 Pompe à chaleur

1.



2.

État	p	h	s	x_v	T
1	5.0 bar	$1450\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$	$5.30\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}\,\text{K}^{-1}$	1.0	7.0 °C
2	17 bar	$1625\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$	$5.30\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}\,\text{K}^{-1}$		
3	17 bar	$1500\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$	$4.90\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}\,\text{K}^{-1}$	1.0	39 °C
4	17 bar	$400\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$	$1.65\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}\,\text{K}^{-1}$	0.0	39 °C
5	5.0 bar	$400\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$	$1.65\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}\,\text{K}^{-1}$	0.13	7.0 °C

3. Source froide – évaporateur, source chaude – condenseur. Pas de partie mobile.

4. $q_C = \Delta h_{34} = -1.10 \times 10^3\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$ car la transformation est isobare, $q_F = \Delta h_{51} = 1.05 \times 10^3\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$ car la transformation est isobare.
Dans le compresseur, pas d'échange thermique mais un travail utile. Transfo. 12 adiabatique réversible donc $w_u = \Delta u_{12} = c_v \Delta T_{12} = \dfrac{n}{m}\dfrac{R}{\gamma - 1}(T_2 - T_1) = \dfrac{1}{M}\dfrac{R}{\gamma - 1}(T_2 - T_1) \simeq 5.04 \times 10^1\,\text{kJ}\,\text{kg}$.
Dans le détendeur, ni travail utile, ni échange thermique.

5. $e = \dfrac{q_C}{w_u} = \dfrac{1.10 \times 10^3}{5.04 \times 10^1} \simeq 21.8$, $e_c = \dfrac{T_C}{T_C - T_F} \simeq 22.5$ (pas à connaitre, on retrouve cette relation à l'aide du 1ère principe et de l'égalité de Carnot–Clausius). On s'approche de la pompe à chaleur réversible, c'est un excellent dispositif !

Pb4 Turboréacteur

1.

p	1.00 bar	10.0 bar	10.0 bar	3.96 bar	1.00 bar
T	300 K	$T_2 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{(1-\gamma)/\gamma} \simeq 579\,\mathrm{K}$	1200 K	$T_4 = T_3 \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{(1-\gamma)/\gamma} \simeq 921\,\mathrm{K}$	621 K

2. Apport de la "source chaude" par la combustion du kérosène $q_C = \Delta h_{23}$ car la transformation est isobare. Donc le transfert thermique massique nécessaire est $q_C = c_p(T_3 - T_2)$.
Intéressons nous au transfert thermique nécessaire par seconde (c'est une puissance...) $\mathcal{P}_C = D_m q_C \simeq 31\,\mathrm{MJ\,s^{-1}}$.
On brûle du kérosène pour apporter cette énergie sous forme thermique, ainsi par seconde il est nécessaire d'apporter une quantité de kérosène

$$D_K = \frac{\mathcal{P}_C}{e_K} \simeq 0.62\,\mathrm{kg\,s^{-1}}\ .$$

3. Le but du turboréacteur est de produire de l'énergie en entraînant une turbine donc la grandeur utile est le travail cédé par le gaz lors de la traversée de la turbine

$$w_{34} = \Delta u_{34} - q_{34} = \Delta u_{34} = c_V(T_4 - T_2) = \frac{c_p}{\gamma}(T_4 - T_3) \simeq -0.199\,\mathrm{M\,J\,kg^{-1}}\ .$$

Le rendement s'écrit donc

$$r = \frac{-w_{34}}{q_C} = \simeq 0.321\ .$$

Pb5 Congélateur réel

L'énergie consommée par un congélateur est un travail, on suppose que le rendement de la pompe mettant le fluide frigorifique en mouvement est de 1.0. Ainsi le travail consommé en une journée est $W = 0.67 \times 10^3\,\mathrm{kW\,h} = 3600 \times 0.67 \times 10^3\,\mathrm{kW\,s} \simeq 2.4 \times 10^6\,\mathrm{J}$.
La congélation consiste à refroidir l'eau d'un aliment depuis θ_i, puis la solidifier et enfin refroidir cette glace jusqu'à θ_f, en une journée le congélateur peut congeler 22 kg donc un transfert thermique (en supposant la transformation isobare), notons pc le pouvoir de congélation. Une journée de fonctionnement correspond à un transfert thermique

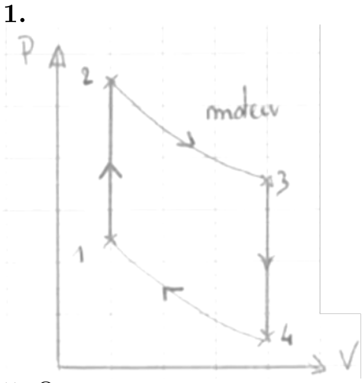
$$Q_{cong} = pc \times (c_d(\theta_{fus} - \theta_i) - \Delta h_{fus} + c_c(\theta_f - \theta_{fus})) \simeq -7.7 \times 10^6\,\mathrm{J}\ .$$

Remarque : le transfert dessus est le transfert reçu par l'aliment à congeler qui est à l'extérieur du système, ainsi le transfert thermique reçu par le système depuis la source froide est $Q_F = -Q_{cong}$.
Ainsi l'efficacité de ce congélateur est

$$e = \frac{Q_F}{W} \simeq 3.2\ .$$

Pb6 Cycle réversible

1.



2. L'opposé de l'aire du cycle correspond au travail reçu par le système lors d'un cycle. Pour avoir un fonctionnement moteur, le cycle doit être parcouru dans le sens anti–trigonométrique.
3. Les transformations $2 \to 3$ et $4 \to 1$ sont isothermes donc $Q_{23} = -W_{23}$ et $Q_{41} = -W_{41}$.
Les transformations $1 \to 2$ et $3 \to 4$ sont isochores donc $W_{12} = W_{34} = 0$.
De plus $\Delta U_{cycle} = \Delta U_{12} + \Delta U_{34} = Q_{12} + Q_{34} = 0$ donc $Q_{12} = -Q_{34}$.
4. Le rendement s'écrit $r = \frac{-W}{Q_{23}} = \frac{-W_{23} - W_{41}}{Q_{23}} = \frac{Q_{23} + Q_{41}}{Q_{23}} = 1 + \frac{Q_{41}}{Q_{23}} < 1$.

5. On a

$$Q_{12} = \Delta U_{12} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_2 - T_1) \simeq 2.08\,\mathrm{kJ}\ .$$

D'autre part on a

$$Q_{23} = -W_{23} = \int_2^3 p\mathrm{d}V = nRT_2 \int_{V_2}^{V_3} \frac{\mathrm{d}V}{V} = nRT_2 \ln\frac{V_3}{V_2} \simeq 2.3\,\mathrm{kJ}\ ;$$

et

$$Q_{41} = -W_{41} = ... = nRT_1 \ln\frac{V_1}{V_4} \simeq -1.73\,\mathrm{kJ}\ .$$

6. D'après les questions précédentes, on peut écrire

$$r = 1 + \frac{T_1 \ln(V_1/V_4)}{T_2 \ln(V_3/V_2)} = 1 + \frac{T_1}{T_2}\frac{ln(1/2)}{\ln(2)} \simeq 0,25\ .$$