Thermodynamique

(Machines thermiques fermées)

Pour réviser le cours

EXERCICE 1 Cycle dans un piston (⋆)

1. La loi de Laplace pour un gaz parfait qui subit une transformation isentropique s'écrit :

$$pV^\gamma = \text{cte} \Leftrightarrow TV^{\gamma-1} = \text{cte} \Leftrightarrow p^{1-\gamma}T^\gamma = \text{cte}$$

La démonstration s'effectue en écrivant les deux identités thermodynamiques et les deux lois de Joule :

$$\mathrm{d}h = c_p\mathrm{d}T = T\mathrm{d}s + v\mathrm{d}p \quad \text{et} \quad \mathrm{d}u = c_v\mathrm{d}T = T\mathrm{d}s - p\mathrm{d}v$$

soit :

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}u} = \gamma = -\frac{v\mathrm{d}p}{p\mathrm{d}v} \Rightarrow \frac{\mathrm{d}p}{p} + \gamma\frac{\mathrm{d}v}{v} = 0 \Rightarrow \boxed{pv^\gamma = \text{cte}}$$

2. La loi de Laplace pour un gaz parfait qui subit une transformation isentropique s'écrit :

$$pV^\gamma = \text{cte} \Leftrightarrow TV^{\gamma-1} = \text{cte} \Leftrightarrow p^{1-\gamma}T^\gamma = \text{cte}$$

soit :

$$\boxed{p_B = p_A\left(\frac{T_A}{T_B}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \simeq 57,7 \text{ bar}}$$

L'équation d'état des gaz parfaits permet de calculer V_B :

$$\boxed{V_B = \frac{nRT_B}{p_B} = \frac{p_AV_A}{T_A} \times \frac{T_B}{p_B} = V_A\left(\frac{T_A}{T_B}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \simeq 7,28 \times 10^{-2} \text{ L}}$$

3. **a.** La transformation $B \to C$ est isotherme. On peut donc écrire $p_BV_B = p_CV_C = p_CV_A$, soit :

$$\boxed{p_C = \frac{p_BV_B}{V_A} = p_B\left(\frac{T_A}{T_B}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = p_A\left(\frac{T_A}{T_B}\right)^{-1} = p_A\frac{T_B}{T_A} \simeq 5,74 \text{ bar}}$$

b. La variation d'entropie sur la transformation $B \to C$ s'écrit :

$$\Delta S_{BC} = \int_B^C \frac{\mathrm{d}U + p\mathrm{d}V}{T} = \int_B^C nR\frac{\mathrm{d}V}{V} = nR\ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right) = nR\ln\left(\left(\frac{T_A}{T_B}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}}\right)$$

soit :

$$\boxed{\Delta S_{BC} = \frac{p_AV_A}{T_A(1-\gamma)}\ln\left(\frac{T_A}{T_B}\right) \simeq 3,20 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}}$$

4. **a.** La variation d'entropie sur la transformation $C \to A$ s'écrit de la même manière :

$$\boxed{\Delta S_{CA} = \frac{p_AV_A}{T_A(\gamma-1)}\ln\left(\frac{T_A}{T_B}\right) \simeq -3,20 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}}$$

b. Le premier principe $Q_{CA} = \Delta U_{CA} + W = \Delta U_{CA} = C_V\int_C^A \mathrm{d}T$, soit :

$$\boxed{Q_{CA} = \frac{p_AV_A}{T_A(\gamma-1)}(T_A - T_C) \simeq -658 \text{ J}}$$

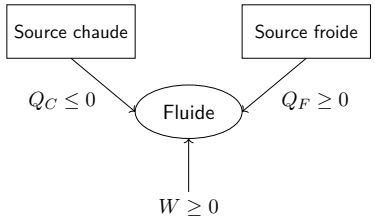
c. L'entropie créée sur la transformation $C \to A$ se calcule à partir du deuxième principe de la thermodynamique.

$$\boxed{S_{CA}^{\text{cr}} = \Delta S_{CA} - S_{CA}^{\text{éch}} = \Delta S_{CA} - \frac{Q_{CA}}{T_A} \simeq 1,78 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} > 0}$$

L'augmentation de l'entropie est liée à l'**irréversibilité de la transformation physique**.

EXERCICE 2 Climatiseur (⋆⋆)

1. Le schéma de principe du climatiseur est représenté ci-dessous :



2. On considère une machine thermique monotherme. D'après le premier principe sur un cycle :

$$\Delta U_{\text{cycle}} = 0 = Q + W \Rightarrow \boxed{Q = -W}$$

D'après l'inégalité de Carnot Clausius :

$$\frac{Q}{T^{\text{éch}}} \leq 0 \Rightarrow Q \leq 0 \Rightarrow \boxed{W \geq 0}$$

Le cycle monotherme est nécessairement récepteur.

3. Le premier principe appliqué à la pièce sur une transformation infinitésimale s'écrit :

$$C\mathrm{d}T = -\delta Q_F$$

Sachant que le premier principe appliqué au fluide sur un cycle s'écrit $W = -Q_F - Q_C$ et que la machine frigorifique a une efficacité $e_c = \frac{Q_F}{W}$ correspondant à celle d'un cycle de Carnot pour lequel $\frac{Q_F}{T} + \frac{Q_C}{T_a} = 0$ et $e_c = \frac{T}{T_a - T}$, on peut écrire que :

$$C\mathrm{d}T = e_c\delta W = \frac{\delta W}{\frac{T_a}{T} - 1} \Rightarrow \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(CT_a\ln(T) - CT\right)\mathrm{d}t = W$$

En intégrant entre l'instant initial et l'instant final (où $T = T_f$), on obtient :

$$CT_a\ln\left(\frac{T_f}{T_a}\right) - C(T_f - T_a) = W \Rightarrow \boxed{W \simeq 1,89 \text{ MJ} \simeq 0,52 \text{ kWh}}$$

4. La durée de l'opération est :

$$\boxed{\Delta t = \frac{W}{\mathcal{P}} \simeq 2\text{h } 6 \text{ min}}$$

Document sous licence Creative Commons « Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 3.0 non transposé (CC BY-NC 3.0) ».
Pour plus d'informations : creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/

L'essentiel

EXERCICE 3 Cycle dans une machine fermée (⋆)

1. Le cycle est moteur puisqu'il est parcouru dans le sens horaire. On a donc $\oint \delta W < 0$.
   Lors de la transformation $C \to D$, il y a un échange thermique avec la source chaude puisque la température augmente. Toutes les phases sont irréversibles sauf si les transformations $D \to A$ et $B \to C$ sont isentropiques.
2. Le rendement du cycle est défini par $\eta = \left|\frac{W}{Q_C}\right| = -\frac{W}{Q_C}$ avec $W = W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA}$.
   En effectuant le premier principe des systèmes fermés sur un cycle, on a :

$$\Delta U = 0 = \underbrace{Q_F + W_{AB}}_{\Delta U_{AB}} + \underbrace{W_{BC}}_{\Delta U_{BC}} + \underbrace{Q_C + W_{CD}}_{\Delta U_{CD}} + \underbrace{W_{DA}}_{\Delta U_{DA}}$$

   Le rendement est donc $\eta = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$ avec $Q_C = \Delta H_{CD} = C_p(T_D - T_C)$ et $Q_F = \Delta H_{AB} = C_p(T_B - T_A)$. On peut donc exprimer le rendement uniquement à partir des températures aux points A, B, C et D :

$$\eta = 1 + \frac{T_B - T_A}{T_D - T_C}$$

   Si les transformations $B \to C$ et $D \to A$ sont isentropiques, on peut écrire :

$$T_B = T_C \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_C \tau^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad \text{et} \quad T_A = T_D \tau^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

   .
   L'expression du rendement η devient donc :

$$\boxed{\eta = 1 - \tau^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}}$$

3. Il faut que **les phases d'admission et d'échappement se compensent parfaitement**. Autrement dit, les deux transformations se superposent dans le diagramme (p, V).

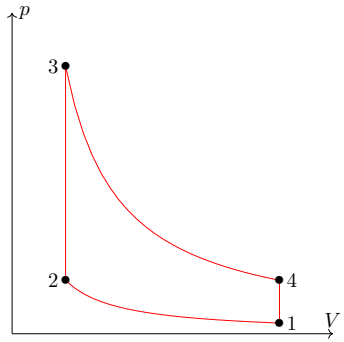
EXERCICE 4 Moteur de Stirling (⋆⋆)

1. Les valeurs de p, V et T sont répertoriées ci-dessous.

État 1	État 2	État 3	État 4
$p_1 \simeq 1$ bar	$p_2 = 10p_1 \simeq 10$ bar	$p_3 = \frac{T_c}{T_f} p_2 \simeq 20$ bar	$p_4 = \frac{V_2}{V_1} p_3 \simeq 2$ bar
$V_1 = \frac{nRT_1}{p_1} \simeq 0,98$ L	$V_2 = \frac{V_1}{10} \simeq 0,098$ L	$V_3 = V_2$	$V_4 = V_1$
$T_1 = T_f \simeq 300$ K	$T_2 = T_1 \simeq 300$ K	$T_3 = T_c \simeq 600$ K	$T_4 = T_3 \simeq 600$ K

2. Le cycle représenté dans le diagramme de Watt est parcouru dans le sens horaire, il s'agit donc d'un cycle moteur.

Document sous licence Creative Commons « Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 3.0 non transposé (CC BY-NC 3.0) ».
Pour plus d'informations : creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/



3. Le travail et le transfert thermique sont obtenus en appliquant conjointement le premier principe et la première loi de Joule $\Delta U = W + Q = \frac{nR}{\gamma - 1}\Delta T$. L'ensemble des travaux et transferts thermiques est représenté dans le tableau ci-dessous :

Transformation	Q	W
$1 \to 2$	$-nRT_f \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \simeq -230$ J	$nRT_f \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \simeq 230$ J
$2 \to 3$	$\frac{nR}{\gamma-1}(T_3 - T_2) \simeq 249$ J	0
$3 \to 4$	$nRT_c \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \simeq 459$ J	$-nRT_c \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \simeq -459$ J
$4 \to 1$	$\frac{nR}{\gamma-1}(T_1 - T_4) \simeq -249$ J	0

4. Le travail total sur un cycle est $W = W_{1\to2} + W_{3\to4} \simeq -229$ J ≤ 0. Comme ce résultat est négatif, la machine thermique fournit un travail à son environnement : il s'agit donc d'un moteur.
5. Ce système produit un travail mécanique $W \simeq -229$ J et consomme un transfert thermique chaud $Q_{2\to3} \simeq +249$ J et $Q_{1\to2} \simeq + - 230$ J.
   Le rendement du moteur est donc :

$$\boxed{\eta = \frac{-W}{Q_{2\to3} + Q_{3\to4}} \simeq 32,3\%}$$

6. Sur un cycle, la variation d'entropie est nulle $\Delta S = 0$, soit :

$$S^{\text{cr}} = -S^{\text{éch}} = -\frac{Q_{1\to2}}{T_f} - \frac{Q_{2\to3}}{T_c} - \frac{Q_{3\to4}}{T_c} - \frac{Q_{4\to1}}{T_f} = nR\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) - \frac{nR}{\gamma-1}\left(1 - \frac{T_2}{T_c}\right) - nR\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) - \frac{nR}{\gamma-1}\left(1 - \frac{T_4}{T_f}\right)$$

   soit :

$$\boxed{S^{\text{cr}} = \frac{nR}{\gamma-1}\left(\frac{T_4}{T_f} + \frac{T_2}{T_c} - 2\right) \simeq 0,42 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}}$$

   L'irréversibilité du cycle vient des transformations isochores : le gaz n'est pas à la température du thermostat.
7. Le transfert thermique $Q_{2\to3}$, qui diminue le rendement, est exactement opposé au transfert thermique $Q_{4\to1}$. Plutôt que de perdre le transfert thermique $Q_{4\to1}$ en le cédant à la source froide, l'idée de Stirling consiste à le céder au régénérateur pour qu'il le rende au gaz lors de l'étape $2 \to 3$. Le transfert thermique n'est alors plus fourni par la source chaude, ce qui est plus économique.
8. Comme $Q_{2\to3}$ n'est plus fourni par la source chaude, il ne compte plus dans le rendement, qui devient :

$$\eta = -\frac{W}{Q_{3\to4}} = \frac{T_c - T_f}{T_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \simeq 50,0\%$$

   On reconnaît l'expression du rendement de Carnot qui est le meilleur rendement atteignable avec un moteur thermique évoluant entre les sources de chaleur aux températures T_c et T_f.

Document sous licence Creative Commons « Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 3.0 non transposé (CC BY-NC 3.0) ».
Pour plus d'informations : creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/

➲ Source : CCP, MP, 2011

EXERCICE 5 Moteur à double combustion (⋆⋆)

1. La transformation $1 \to 2$ est une isentropique d'un gaz parfait. les lois de Laplace permettent donc d'établir :

$$\boxed{T_2 = T_m \beta^{\gamma-1} \simeq 910 \text{ K}}$$

La transformation $2 \to 3$ est iscochore, donc :

$$\boxed{T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2} = T_2 \frac{p_M}{p_m} \beta^{-\gamma} \simeq 1034 \text{ K}}$$

La transformation $4 \to 5$ est identropique, d'après la loi de Laplace, on a donc :

$$\boxed{T_5 = T_M^{\gamma} \left(\frac{p_m}{P_M T_m} \right)^{\gamma-1} \simeq 881 \text{ K}}$$

2. Le transfert thermique masseique reçu par l'air lors de la combustion est :

$$q_c = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)$$

soit, d'après les relations de Mayer :

$$\boxed{q_c = \frac{r}{\gamma - 1}(T_3 - T_2) + \frac{r\gamma}{\gamma - 1}(T_4 - T_3) \simeq 1131,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

3. Le transfert thermique massique q_f échangé avec le milieu extérieur est :

$$\boxed{q_f = c_v(T_1 - T_5) = \frac{r}{\gamma - 1}(T_1 - T_5) \simeq -421,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

4. Le premier principe sur un cycle s'écrit :

$$\boxed{w + q_f + q_c = 0 \Rightarrow w = -q_f - q_c \simeq -710,0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

5. Le rendement de ce moteur est :

$$\boxed{\eta = -\frac{w}{q_c} = 1 + \frac{q_f}{q_c} \simeq 62,7\%}$$

La valeur trouvée est trop optimiste puisque généralement, les moteurs thermiques ont des rendements qui ne dépassent pas les $30\% \sim 35\%$. Ici, le rendement de Carnot est très élevé ($\eta_c = 1 - \frac{T_m}{T_M} \simeq 86\%$) du fait de la température de la source chaude très élevée ($T_M \simeq 2073$ K alors que la température de fusion de l'acier est $T_{\text{fus}} \simeq 1811$ K il faudrait, dans les faits, s'en tenir à une température maximale de 1500 K dans la chambre de combustion).

➲ Source : E. Thibierge

Document sous licence Creative Commons « Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 3.0 non transposé (CC BY-NC 3.0) ».
Pour plus d'informations : creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/

Pour aller plus loin

EXERCICE 6 Cycle thermodynamique (⋆⋆)

1. L'aire intérieure du cycle a pour expression

$$-W = \oint p \mathrm{d}V$$

il s'agit de l'**opposé du travail reçu par le système**. Pour que le travail soit fourni à l'environnement (cycle moteur), il faut que $W < 0$, soit $\oint p\mathrm{d}V \geq 0$. Le cycle doit donc être parcouru dans le sens **horaire** (NB : Les moteurs tournent comme des horloges).

2. Sur la transformation isotherme $2 \to 3$, $W_{23} = -\int_2^3 p\mathrm{d}V = -\int_2^3 nRT_2 \frac{\mathrm{d}V}{V} = nRT_2 \ln\left(\frac{V_2}{V_3}\right) < 0$, avec n la quantité de matière de gaz parfait subissant le cycle.
D'après le premier principe et la première loi de Joule, le transfert thermique s'écrit :

$$\boxed{Q_{23} = \Delta U_{23} - W_{23} = C_v(T_3 - T_2) - W_{23} = -W_{23} = nRT_2 \ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right)}$$

Par analogie, sur la transformation $4 \to 1$, on a :

$$\boxed{Q_{41} = -W_{41} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_3}\right)}$$

Sur la transformation isochore $1 \to 2$, $W_{12} = -\int_1^2 p\mathrm{d}V = 0$. De fait, d'après le premier principe, la première loi de Joule et la relation de Mayer :

$$\boxed{Q_{12} = \Delta U_{12} = C_v(T_2 - T_1) = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_2 - T_1)}$$

Par analogie, sur la transformation $3 \to 4$, $\boxed{W_{34} = 0}$ et $\boxed{Q_{34} = -\frac{nR}{\gamma - 1}(T_2 - T_1)}$.

3. D'après le premier principe écrit sur un cycle :

$$\boxed{Q_{12} + W_{23} + Q_{23} + W_{34} + Q_{34} + Q_{41} = 0}$$

Le rendement du moteur peut être défini par :

$$\boxed{\eta = \frac{-W_{23} - W_{34}}{Q_{23}} = 1 + \frac{Q_{41}}{Q_{23}}}$$

4. On peut calculer numériquement les grandeurs précédemment exprimées :

$$Q_{12} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_2 - T_1) \simeq 2,08 \text{ kJ} \quad \text{et} \quad Q_{23} = nRT_2 \ln(2) \simeq 2,31 \text{ kJ} \quad \text{et} \quad Q_{41} = -nRT_1 \ln(2) \simeq -1,73 \text{ kJ}$$

5. Le rendement a pour expression :

$$\boxed{\eta = 1 + \frac{-nRT_1 \ln(2)}{nRT_2 \ln(2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \simeq 25\%}$$

Ce cyle a un rendement de Carnot (il s'agit du cycle de Stirling).

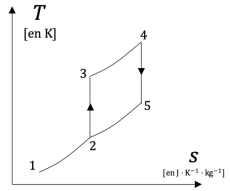
Document sous licence Creative Commons « Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 3.0 non transposé (CC BY-NC 3.0) ».
Pour plus d'informations : creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/

➲ Source : J. Ph. Qadri

EXERCICE 7 Cycle diesel à suralimentation (⋆⋆⋆)

PARTIE A :

1. Le cycle thermodynamique est représenté dans le diagramme (T, s) ci-dessous :



2. Les valeurs des variables thermodynamiques (p, V, T) sont répertoriées pour chaque point dans le tableau suivant :

Point	②	③	④	⑤
p (bar)	$p_2 = 1$ bar	$p_2 a^\gamma \simeq 32$ bar	$p_2 a^\gamma \simeq 32$ bar	$2,6$ bar
V(L)	$V_2 = 3,3$ L	$\frac{V_2}{a} = 0,28$ L	$\varepsilon\frac{V_2}{a} = 0,56$ L	$V_2 = 3,3$ L
T (K)	$T_2 = 298$ K	$T_2 a^{\gamma-1} = 805$ K	1618 K	790 K

On note $\gamma = \frac{c_p}{c_p - r} \simeq 1,40$ le coefficient de Laplace.

3. Le transfert thermique de la transformation $3 \to 4$ se calcule à partir d'un premier principe des systèmes fermés :

$$Q_{34} = \Delta U_{34} - W_{34}$$

Sur une transformation isobare, $\Delta U + p\Delta V = \Delta(U + pV) = \Delta H$, on a donc :

$$\boxed{Q_{34} = \frac{mr\gamma}{\gamma - 1}(\varepsilon - 1)T_3 = \frac{p_2 V_2 \gamma}{\gamma - 1}(\varepsilon - 1)a^{\gamma-1} \simeq 3,12 \text{ kJ}}$$

4. Le travail W fourni par le moteur est exprimé à partir de l'expression du transfert thermique Q_{52} :

$$Q_{52} = \Delta U_{52} - \underbrace{W_{52}}_{0} = mc_v(T_2 - T_5) = \frac{p_2 V_2}{\gamma - 1}(1 - \varepsilon^\gamma) = -1352 \text{ J}$$

Sur un cycle, la variation d'énergie interne est nulle, soit $W + Q_{52} + Q_{34} = 0$. On peut donc en déduire :

$$\boxed{W = -Q_{52} - Q_{34} = -1768 \text{ J} < 0 \text{ (cycle moteur)}}$$

5. Le rendement thermodynamique peut être calculé de la manière suivante :

$$\boxed{\eta = \frac{-W}{Q_{34}} = 1 + \frac{Q_{52}}{Q_{34}} = 1 + \frac{1}{\gamma a^{\gamma-1}}\left(\frac{1 - \varepsilon^\gamma}{\varepsilon - 1}\right) \simeq 57\%}$$

6. Pour calculer la puissance du moteur, il faut compter le nombre de cycles thermodynamiques par minute. Sur les 3600 tours par minute, il n'y a en fait que 1800 cycles thermodynamiques puisqu'il s'agit d'un moteur 4-temps. Soit $N = 30$ cycles par seconde. On peut donc calculer la puissance $\mathcal{P}$ du moteur :

$$\boxed{\mathcal{P} = -N \times W = 53 \text{ kW}}$$

Document sous licence Creative Commons « Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 3.0 non transposé (CC BY-NC 3.0) ».
Pour plus d'informations : creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/

PARTIE B :

1. Les grandeurs thermodynamiques du nouveau cycle sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Point	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
Pression	$1,0$	$p_7 = p_8 \simeq 1,8$ bar	$p_8 \simeq 1,8$ bar	$p_9 = p_8\left(\frac{V_8}{V_9}\right)^\gamma \simeq 58,4$ bar	$p_{10} = p_9 \simeq 58,4$ bar	$p_{11} = p_{10}\left(\frac{V_{10}}{V_{11}}^\gamma\right) \simeq 4,87$ bar
Volume	$\frac{V_6 = nRT_6}{p_6} \simeq 5,2$ L	$\frac{V_7 = nRT_7}{p_7} \simeq 3,4$ L	$V_8 = V_2 \simeq 3,3$ L	$V_9 = V_3 \simeq 0,28$ L	$V_{10} = \varepsilon V_9 = 0,56$ L	$V_{11} = V_2 \simeq 3,3$ L
Température	$T_6 = 298$ K	$T_7 = T_6\left(\frac{p_6}{p_7}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \simeq 353$ K	$\simeq T_8 \simeq 343$ K	$T_9 = T_8\left(\frac{V_8}{V_9}\right)^{\gamma-1} \simeq 920$ K	$T_{10} = \frac{N_{10}p_{10}}{nR} \simeq 1873$ K	$T_{11} = 928$ K

2. Le transfert thermique peut être calculé à partir du premier principe :

$$\boxed{Q_{9\to10} = \Delta H_{9\to10} = \frac{nR\gamma}{\gamma - 1}(T_{10} - T_9) \simeq 5,8 \text{ kJ}}$$

Le travail W récupéré sur un cycle est :

$$W = -Q_{9\to10} - Q_{11\to12} = \frac{p_8 V_8 \gamma}{\gamma - 1}(\varepsilon - 1) + \frac{p_8 V_8}{\gamma - 1}(1 - \varepsilon^\gamma) \simeq -3,3 \text{ kJ}$$

Sur 3600 tours, il n'y a que 1800 cycles thermodynamiques, la puissance $\mathcal{P}$ fournie par le moteur est donc :

$$\boxed{\mathcal{P} = N \times W \simeq 99,8 \text{ kW}}$$

3. Le rendement du cycle thermodynamique est donc $\boxed{\eta = -\frac{W}{Q_{9\to10}} \simeq 57\%}$. Ce résultat était prévisible puisque le cycle thermodynamique n'a pas changé : seule la quantité de matière n à l'entrée du cycle a changé.
4. Le turbocompresseur permet donc d'avoir une **puissance plus élevée** en sortie du moteur.

EXERCICE 8 Machine frigorifique (⋆⋆⋆)

1. En utilisant des transformations fictives, on peut établir que :

$$s_B - s_A = 0 = -x_B\frac{\ell_v(T_1)}{T_1} + c\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \Rightarrow \boxed{x_B = cT_1\frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\ell_v(T_1)}}$$

et :

$$s_C - s_A = 0 = -x_C\frac{\ell_v(T_1)}{T_1} + c\ln\left(\frac{T_2}{T_1} + \frac{\ell_v(T_2)}{T_2}\right) \Rightarrow \boxed{x_C = cT_1\frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \frac{\ell_v(T_2)}{T_2}}{\ell_v(T_1)}}$$

2. Plutôt que de calculer le travail sur les quatre transformations, il est préférable de calculer le transfert thermique sur deux d'entre-elles :

$$Q_{BC} = m(x_C - x_B)\ell_v(T_1) = mT_1\frac{\ell_v(T_2)}{T_2}$$

De-même :

Document sous licence Creative Commons « Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 3.0 non transposé (CC BY-NC 3.0) ».
Pour plus d'informations : creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/

$$Q_{DA} = -m\ell_v(T_2)$$

On en déduit à l'aide du premier principe :

$$\boxed{W = -Q_{BC} - Q_{DA} = m\ell_v(T_2)\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \simeq 90,3 \text{ kJ}}$$

Il s'agit bien d'un cycle récepteur avec $W > 0$.

3. L'efficacité de la machine correspond à l'efficacité de Carnot puisqu'il s'agit d'un cycle de Carnot (les isothermes et les isobares sont confondues sous la courbe de saturation) :

$$\boxed{e = e_c = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \simeq 13,4}$$

Document sous licence Creative Commons « Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 3.0 non transposé (CC BY-NC 3.0) ».
Pour plus d'informations : creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/