

TD de Thermodynamique (GP, GC, GI, MSD) -S1

Série 4

Exercice 1

---

Une masse  $m$  d'un gaz parfait est dans un état initial caractérisé par une température  $T_0$ , une pression  $P_0$  et une masse volumique  $\rho_0$ . Cette masse de gaz subit une détente adiabatique réversible. On suppose que pour le gaz parfait considéré, on a  $\gamma = 7/5$

Etablir en fonction de ces données et en fonction de la pression  $P$  du gaz (après la détente) les grandeurs suivantes :

1. Le volume  $V$  du gaz, sa masse volumique  $\rho$  et sa température  $T$ .
2. Les quantités de travail et de chaleur échangées au cours de la transformation.
3. La variation d'énergie interne  $\Delta U$ ; la variation d'enthalpie  $\Delta H$  et la variation d'entropie  $\Delta S$ .

Exercice 2

---

On possède un morceau de fer froid de masse A  $m_1 = 100g$  à la température  $T_1 = 0^\circ C$ . On le met en contact thermique avec un morceau de cuivre chaud de masse B  $m_2 = 100g$  à la température  $T_2 = 200^\circ C$ . On donne pour le fer  $c_1 = 460 J.Kg^{-1}K^{-1}$  et pour le cuivre  $c_2 = 385 J.Kg^{-1}K^{-1}$ . Les 2 morceaux (A+B) forment un système isolé (pas d'échange d'énergie avec l'extérieur).

1. En appliquant le premier principe de la thermodynamique relatif au système (A+ B), prouvez que  $Q_A = -Q_B$ , c'est-à-dire que la chaleur perdue par un morceau est intégralement gagnée par l'autre.
2. Calculez la température finale  $T_f$  des deux corps en équilibre thermique.
3. Si l'on souhaite réaliser un dissipateur thermique (pour évacuer la chaleur perdue par un composant électronique), a-t-on intérêt à prendre du zinc  $c_{zn} = 389 J.Kg^{-1}K^{-1}$  ou de l'aluminium  $c_{al} = 896 J.Kg^{-1}K^{-1}$  ?
4. Calculez la variation d'entropie du corps chaud  $\Delta S_B$ . Le corps a-t-il perdu ou reçu de l'entropie ?
5. Est-ce que la transformation est réversible ?

Exercice 3

Le cycle d'une machine thermique est composé d'une compression adiabatique AB, d'un chauffage isochore BC, d'une détente adiabatique CD et d'un refroidissement isochore DA.

1. Tracer l'allure du cycle décrit par une mole de gaz dans le diagramme de Clapeyron.

Le cycle est-il moteur ou récepteur ?

2. Calculer pression, température et volume en chaque point en fonction de  $P_A$ ,  $T_A$ ,  $R$  et

$$a = \frac{V_A}{V_B} \text{ et la chaleur } Q_0 \text{ reçue par le gaz entre B et C .}$$

3. Calculer le travail reçu par le gaz.

4. Calculer le rendement du système  $\eta$  en fonction uniquement de  $a$  .

On donne :

$$P_A = 1 \text{ bar} ; T_A = 27^\circ\text{C} ; \gamma = 1.4 ; a = \frac{V_A}{V_B} = 8 ; Q_0 = 25 \text{ kJ et } R = 8.3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}.$$

Exercice 4

On considère un moteur à combustion interne fonctionnant suivant le cycle Diesel.

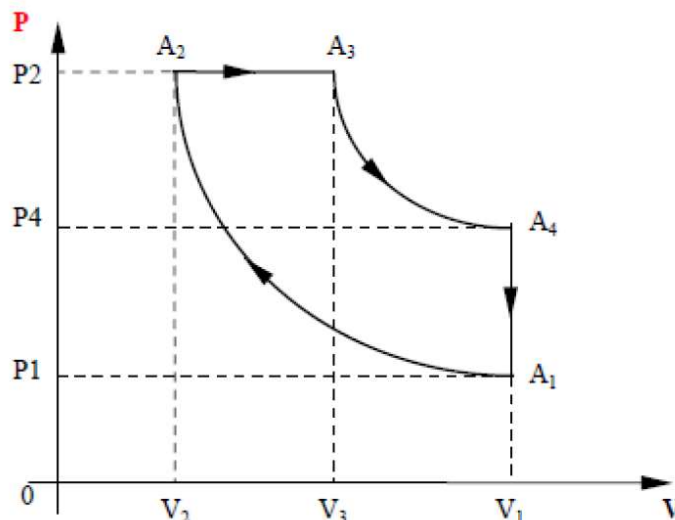
$A_1 \rightarrow A_2$  : Compression adiabatique réversible de l'air caractérisée par le rapport volumétrique :

$$x = \frac{V_1}{V_2}$$

$A_2 \rightarrow A_3$  : Injection du carburant finement pulvérisé dans l'air comprimé et chaud provoquant son inflammation. La combustion se produit à pression constante.

$A_3 \rightarrow A_4$  : Détente adiabatique réversible des gaz.

$A_4 \rightarrow A_1$  : Ouverture de la soupape d'échappement, ramenant instantanément la pression à  $P_1$ , les gaz subissant un refroidissement isochore.



La quantité de carburant injecté étant faible devant la quantité d'air aspiré, on considérera que le nombre total de moles n'est pas modifié par la combustion.

On assimile les gaz à un gaz parfait de constante  $R = 8.3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ , de capacité thermique molaire à pression constante  $C_p = 29 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ . On donne  $\gamma = 1.4$ .

On étudie les transformations subies par une mole de gaz parfait.

1. Ce gaz est admis dans les cylindres à la pression  $P_1 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$  et à la température  $T_1 = 330 \text{ K}$ .
  - a. Calculer le volume  $V_1$ .
  - b. Calculer la pression  $P_2$  et la température  $T_2$  en fin de compression sachant que  $x = 14$
2. En fin de combustion, la température du gaz est  $T_3 = 2260 \text{ K}$ . Calculer le volume  $V_3$  et la chaleur  $Q_{23}$  reçue par ce gaz au cours de la transformation  $A_2 \rightarrow A_3$ .
3. Calculer la pression  $P_4$  et la température  $T_4$  en fin de détente.
4. Calculer la quantité de chaleur  $Q_{41}$  reçue par le gaz au cours de la transformation isochore.
5. En appliquant le premier principe, calculer le travail fourni par le moteur au cours d'un cycle.
6. Calculer le rendement  $\eta$  de ce moteur thermique.

## Correction de la série 4

### Exercice 1

---

1. Le volume  $V$  du gaz, sa masse volumique  $\rho$  et sa température  $T$  :

Le système gaz parfait subit ici une transformation adiabatique réversible entre l'état initial  $(P_0, V_0 = \frac{m}{\rho_0}, T_0)$  et l'état final  $(P, V, T)$ . La loi de Laplace s'applique à cette transformation,

donc :  $PV^\gamma = P_0V_0^\gamma \Rightarrow V^\gamma = \frac{P}{P_0} V_0^\gamma$  avec  $\gamma = 7/5$  et  $V_0 = \frac{m}{\rho_0}$

$$V = \left(\frac{P_0}{P}\right)^{1/\gamma} V_0 \Rightarrow V = \frac{m}{\rho_0} \left(\frac{P_0}{P}\right)^{5/7}$$

La densité du gaz à l'état final est :  $\rho = \frac{m}{V}$ , En utilisant l'expression précédente du volume, il

vient :  $\rho = \rho_0 \left(\frac{P_0}{P}\right)^{5/7}$ .

Pour le calcul de la température à l'état finale, on utilise la loi de Laplace sous sa forme en

fonction des variables thermodynamiques (T,P) :  $T^\gamma P^{1-\gamma} = T_0^\gamma P_0^{1-\gamma}$ , D'où :  $T^\gamma = T_0^\gamma \frac{P_0^{1-\gamma}}{P^{1-\gamma}}$

Alors  $T = T_0 \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$ , Tenant compte de  $\gamma = 7/5$ , l'expression de la température finale

devient :  $T = T_0 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{2}{7}}$ .

2. La transformation est adiabatique, donc la quantité de chaleur échangée est nulle :  $Q = 0$ .

Le travail échangé durant la transformation s'exprime par :

$\delta W = -PdV$  et  $PV^\gamma = P_0V_0^\gamma = Cste$  alors  $W = \frac{PV - P_0V_0}{\gamma - 1}$  En utilisant  $\gamma = 7/5$ , les

expressions établies dans la première question pour les volumes  $V$  et  $V_0$ , il vient :

$$W = \frac{5}{2} \left( P \cdot \frac{m}{\rho_0} \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right)^{5/7} - P_0 \frac{m}{\rho_0} \right) = \frac{5}{2} P_0 \frac{m}{\rho_0} \left( \left(\frac{P}{P_0}\right)^{2/7} - 1 \right)$$

3. La variation de l'énergie interne durant la transformation  $(P_0, V_0, T_0) \rightarrow (P, V, T)$  est :

$\Delta U = W + Q$  avec  $Q = 0$  D'où :  $\Delta U = W = \frac{5}{2} P_0 \frac{m}{\rho_0} \left( \left(\frac{P}{P_0}\right)^{2/7} - 1 \right)$

4. La variation de l'enthalpie durant la transformation  $(P_0, V_0, T_0) \rightarrow (P, V, T)$  est :

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) \text{ or } \Delta(PV) = PV - P_0V_0 = (\gamma - 1)W$$

$$D'où \Delta H = W + (\gamma - 1)W = \gamma W \text{ Avec de } \gamma = 7/5$$

$$\text{On obtient finalement : } \Delta H = \frac{7}{2} P_0 \frac{m}{\rho_0} \left( \left( \frac{P}{P_0} \right)^{2/7} - 1 \right)$$

La variation d'entropie durant la transformation réversible  $dS = \frac{\delta Q}{T}$ , mais la

transformation est adiabatique, donc  $\delta Q = 0$ , D'où  $dS = 0$  et par intégration  $\Delta S = 0$

### Exercice 2

1. Puisque le système n'échange pas d'énergie (thermique ou mécanique) avec l'extérieur (le système est isolé et les parois sont rigides) alors  $W_{AB} = 0$  et  $Q_{AB} = 0$

$$\text{Or } Q_{AB} = Q_A + Q_B = 0 \text{ d'où } Q_A = -Q_B$$

Le 1<sup>er</sup> principe ne nous permet pas de savoir si la chaleur échangée par le corps chaud  $Q_B$  est telle que  $Q_B > 0$  ou  $Q_B < 0$ . Le second principe va nous prouver que  $Q_B < 0$  c'est-à-dire la chaleur perdue par le corps le plus chaud.

2. La température finale  $T_f$  des deux corps en équilibre thermique :

$$Q_A + Q_B = 0$$

Or  $Q_A = m_1 c_1 (T_f - T_1)$  la quantité de chaleur que le fer absorbe pour augmenter sa température  $T_1$  à  $T_f$ .

$Q_B = m_2 c_2 (T_f - T_2)$  la quantité de chaleur cédée par le cuivre pour sa température  $T_2$  passe à  $T_f$ .

$$\text{Soit : } m_1 c_1 (T_f - T_1) + m_2 c_2 (T_f - T_2) = 0$$

$$m_1 c_1 T_f - m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_f - m_2 c_2 T_2 = 0$$

$$(m_1 c_1 + m_2 c_2) T_f = m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2 \rightarrow T_f = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$$

$$\text{AN: } T_f = \frac{0.1 \times 460 \times 273 + 0.1 \times 385 \times (20)}{0.1 \times 460 + 0.1 \times 385} = 91.12^\circ\text{C} = 364.12\text{K}$$

- Il faut prendre de l'aluminium car sa capacité thermique est plus élevée : sa température va moins varier que celle de zinc. C'est le plus cher que le zinc, les dissipateurs thermiques sont souvent de l'aluminium.
- La variation d'entropie du corps chaud  $\Delta S_B$  est :

$$\Delta S_B = \int_{T_2}^{T_f} \frac{Q_B}{T} = \int_{T_2}^{T_f} \frac{m_2 c_2 dT}{T} = m_2 c_2 \int_{T_2}^{T_f} \frac{dT}{T} = m_2 c_2 \ln \frac{T_f}{T_2}$$

$$\text{AN : } \Delta S_B = 0.1 \times 385 \times \ln \frac{364.12}{200+273} = -10.06 \text{ J/K}$$

Il y'a une perte d'entropie car  $\Delta S_B < 0$

- La transformation est réversible ?

Il suffit de calculer  $\Delta S_{A+B}$  et de voir si  $\Delta S_{A+B} > 0$  car le système est isolé.

$$\Delta S_{A+B} = \Delta S_A + \Delta S_B = \int_{T_1}^{T_f} \frac{m_1 c_1 dT}{T} + \int_{T_2}^{T_f} \frac{m_2 c_2 dT}{T} = m_1 c_1 \ln \frac{T_f}{T_1} + m_2 c_2 \ln \frac{T_f}{T_2}$$

$$\text{AN : } \Delta S_{A+B} = 0.1 \times 460 \times \ln \frac{364.12}{273} + 0.1 \times 385 \times \ln \frac{364.12}{200+273} = 3.17 \text{ J/K}$$

Donc on a une transformation irréversible,  $\Delta S_{A+B}$  c'est l'entropie créée ou produite.

### Exercice 3

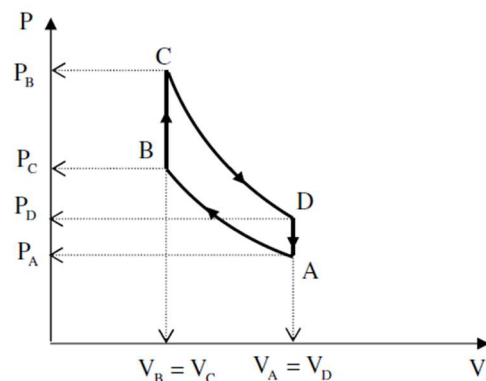
On supposera que le gaz est parfait et que les transformations adiabatiques sont ici quasi-statiques.

Le cycle comprend les transformations suivantes :

- $(P_A, V_A, T_A) \rightarrow (P_B, V_B, T_B)$ : compression adiabatique ;
- $(P_B, V_B, T_B) \rightarrow (P_C, V_C, T_C)$ : échauffement isochore ;
- $(P_C, V_C, T_C) \rightarrow (P_D, V_D, T_D)$ : détente adiabatique ;
- $(P_D, V_D, T_D) \rightarrow (P_A, V_A, T_A)$ : refroidissement isochore.

- Le diagramme de Clapeyron décrivant ce cycle est le suivant :

Le cycle est moteur car il est décrit dans le sens des aiguilles d'une montre.



2. Calculer pression, température et volume en chaque point en fonction de  $P_A$ ,  $T_A$ ,  $R$  et

$a = \frac{V_A}{V_B}$  et la chaleur  $Q_0$  reçue par le gaz entre B et C :

- Pression, température et volume au point A :

On a déjà  $P_A$  et  $T_A$ . Pour le calcul de  $V_A$ , on utilise l'équation d'état des gaz parfaits sachant

que le nombre de moles  $n=1$ , soit  $P_A V_A = RT_A$ . D'où  $V_A = \frac{RT_A}{P_A}$

$$\text{AN : } V_A = \frac{8.3145 \times (27+273)}{10^5} = 2.49 \cdot 10^{-2} m^3$$

- Pression, température et volume au point B :

La transformation (AB) est une compression adiabatique quasistatique, donc la loi de Laplace

s'applique, d'où :  $P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma$ . La pression est alors donnée par  $P_B = P_A \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^\gamma = P_A (a)^\gamma$

$$\text{AN : } P_B = 10^5 \times (8)^{1.4} = 1.84 \cdot 10^6 Pa$$

Le calcul de la température en B se fait en utilisant la loi de Laplace dans sa forme en fonction du couple des variables thermodynamiques (T,P). Celle-ci s'écrit :  $T_B^\gamma P_B^{1-\gamma} = T_A^\gamma P_A^{1-\gamma}$ , d'où

l'on tire :  $T_B = T_A \left(\frac{P_A}{P_B}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$  avec  $P_B = P_A (a)^\gamma$  l'expression de la température en B devient :

$$T_B = T_A a^{\gamma-1}$$

$$\text{AN : } T_B = (27 + 273) \times 8^{1.4-1} = 690 K$$

Le volume en B se calcule en utilisant l'équation d'état des gaz parfait :  $P_B V_B = RT_B$ , d'où

$V_B = R \frac{T_B}{P_B}$ , ce qui donne en remplaçant  $P_B$  et  $T_B$  par ses expressions établies ci-dessus :

$$V_B = \frac{R T_A}{a P_A}$$

$$\text{AN : } V_B = \frac{8.3145 \times (27+273)}{8 \times 10^5} = 3.1210^{-3} m^3$$

- Pression, température et volume au point C :

La transformation (BC) est un échauffement isochore. D'où  $V_B = V_C$ . ainsi  $V_C = \frac{R T_A}{a P_A}$

$$\text{AN : } V_C = \frac{8.3145 \times (27+273)}{8 \times 10^5} = 3.1210^{-3} m^3$$

La transformation (BC) est isochore, donc la variation de l'énergie interne qui lui est associée est :  $\Delta U = W + Q = 0 + Q_0 = Q_0$ . Par ailleurs le gaz est parfait, donc il obéit à la première loi

de Joule qui permet d'écrire  $\Delta U = C_v(T_C - T_B) = \frac{R}{\gamma-1} (T_C - T_B)$ . D'où :  $\frac{R}{\gamma-1} (T_C - T_B) = Q_0$

Et  $T_C = T_B + \frac{\gamma-1}{R} Q_0$ , soit en utilisant l'expression de  $T_B$  établie ci-dessus :

$$T_C = T_A a^{\gamma-1} + \frac{\gamma-1}{R} Q_0$$

AN :

$$T_C = (27 + 273) \times 8^{1.4-1} + \frac{1.4-1}{8.3145} \times 25 \times 10^3 = 1892 \text{ K}$$

Le calcul de la pression est fait en utilisant la loi des gaz parfaits  $P_C V_C = RT_C$ , ce qui donne :

$P_C = \frac{RT_C}{V_C}$  En utilisant les expressions de  $T_C$  et  $V_C$  établies précédemment, il vient :

$$P_C = R \frac{T_A a^{\gamma-1} + \frac{\gamma-1}{R} Q_0}{\frac{R T_A}{a P_A}}, \text{ soit après simplification : } P_C = P_A \left( a^\gamma + \frac{(\gamma-1)Q_0}{R T_A} a \right)$$

$$\text{AN : } P_C = 10^5 \times \left( 8^{1.4} + \frac{(1.4-1) \times 25 \times 10^3}{8.3145 \times (27+273)} \times 8 \right) = 5.04 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

- Pression, température et volume au point D :

La transformation (DA) est un échauffement isochore. D'où  $V_D = V_A$ . ainsi  $V_D = \frac{R T_A}{a P_A}$

La transformation (CD) est une compression adiabatique quasistatique, donc la loi de Laplace s'applique, d'où :  $P_D V_D^\gamma = P_C V_C^\gamma$ . La pression est alors donnée par  $P_D = P_C \left( \frac{V_C}{V_D} \right)^\gamma$ . Avec les expressions de  $V_C$ ,  $V_D$  et  $P_C$  établies précédemment, il vient :

$$P_D = P_A \left( 1 + \frac{(\gamma-1)Q_0}{R T_A} a^{1-\gamma} \right)$$

$$\text{AN : } P_D = 10^5 \times \left( 1 + \frac{(1.4-1) \times 25 \times 10^3}{8.3145 \times (27+273)} \times 8^{1-1.4} \right) = 2.74 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Le calcul de la température en D se fait finalement en utilisant la loi des gaz parfaits :

$P_D V_D = RT_D$ , ce qui donne :  $T_D = \frac{P_D V_D}{R}$ . Cette expression se simplifie en utilisant les

expressions précédentes de  $P_D$  et  $V_D$  sous la forme :  $T_D = T_A + \frac{(\gamma-1)Q_0}{R} a^{1-\gamma}$

$$\text{AN : } T_D = (27 + 273) + \frac{(1.4-1) \times 25 \times 10^3}{8.3145} \times 8^{1-1.4} = 824 \text{ K}$$

3. Par application du premier principe de la thermodynamique au cycle, il vient :

$\Delta U = W + Q_{BC} + Q_{DA} = 0$ . D'où  $W = -Q_{BC} - Q_{DA}$  puisque  $Q_{BC} = Q_0$  il suffit de

Calculer  $Q_{DA}$ . Or on a :  $Q_{DA} = C_v(T_A - T_D) = \frac{R}{\gamma-1} (T_A - T_D)$ .

Soit  $Q_{DA} = -Q_0 a^{1-\gamma}$ . Le travail échangé durant le cycle est alors donné par :

$$W = -Q_0 + Q_0 a^{1-\gamma} = -Q_0(1 - a^{1-\gamma})$$

$$\text{AN : } W = -25 \times 10^3 \times (1 - 8^{1-1.4}) = -14.1 \text{ KJ}$$

4. Le rendement de ce moteur est défini par :  $\eta = \frac{|W|}{Q_{BC}} = \frac{-Q_0(1-a^{1-\gamma})}{Q_0} = (1 - a^{1-\gamma})$

AN :  $\eta = (1 - 8^{1-1.4}) = 56.5 \%$

Exercice 4

---

1. Ce gaz est admis dans les cylindres à la pression  $P_1 = 1\text{bar} = 10^5 \text{ Pa}$  et à la température  $T_1 = 330 \text{ K}$ .

a. Le volume  $V_1$  :

On a un gaz parfait :  $P_1 V_1 = R T_1 \rightarrow V_1 = \frac{R T_1}{P_1}$

AN :  $V_1 = \frac{8.3145 \times 330}{10^5} = 0.0274 \text{ m}^3$

b. La pression  $P_2$  et la température  $T_2$  en fin de compression sachant que  $x = 14$  :

On a  $A_1 \rightarrow A_2$ : Compression adiabatique réversible de l'air, alors on utilise la loi de Laplace :

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \rightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma = P_1 (x)^\gamma$$

AN :  $P_2 = 10^5 \times (14)^{1.4} = 40.2 \times 10^5 \text{ Pa}$

On a un gaz parfait :  $P_2 V_2 = R T_2 \rightarrow T_2 = \frac{P_2 V_2}{R}$  alors  $T_2 = \frac{P_2 V_1}{x R}$

AN :  $T_2 = \frac{40.2 \times 10^5 \times 0.0274}{14 \times 8.3145} = 946 \text{ K}$

2. En fin de combustion, la température du gaz est  $T_3 = 2260 \text{ K}$ .

Le volume  $V_3$  et la chaleur  $Q_{23}$  reçue par ce gaz au cours de la transformation  $A_2 \rightarrow A_3$  :

On a la combustion se produit à pression constante  $A_2 \rightarrow A_3$  et On a un gaz parfait :

$$P_3 V_3 = R T_3 \rightarrow V_3 = \frac{R T_3}{P_3} \text{ et puisque } P_3 = P_2 \text{ alors } V_3 = \frac{R T_3}{P_2}$$

AN :  $V_3 = \frac{8.3145 \times 2260}{40.2 \times 10^5} = 0.0047 \text{ m}^3$

Et puisque la transformation est isobare alors :  $Q_{23} = C_p (T_3 - T_2)$

AN :  $Q_{23} = 29 \times (2260 - 946) = 38 \text{ KJ}$

3. La pression  $P_4$  et la température  $T_4$  en fin de détente :

On a une détente adiabatique réversible des gaz  $A_3 \rightarrow A_4$  donc on utilise la loi de Laplace

$$P_3 V_3^\gamma = P_4 V_4^\gamma \rightarrow P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^\gamma \text{ or } P_3 = P_2 \text{ et } V_4 = V_1 \text{ alors } P_4 = P_2 \left(\frac{V_3}{V_1}\right)^\gamma$$

AN :  $P_4 = 40.2 \times 10^5 \times \left(\frac{0.0047}{0.0274}\right)^{1.4} = 3.4 \times 10^5 \text{ Pa}$

On a un gaz parfait :  $P_4 V_4 = R T_4 \rightarrow T_4 = \frac{P_4 V_4}{R}$

$$\text{AN : } T_4 = \frac{3.4 \times 10^5 \times 0.0274}{8.3145} = 1120 \text{ K}$$

4. La quantité de chaleur  $Q_{41}$  reçue par le gaz au cours de la transformation isochore :

$$Q_{41} = C_v (T_1 - T_4) \text{ or } C_v = \frac{C_p}{\gamma} \text{ donc } Q_{41} = \frac{C_p}{\gamma} (T_1 - T_4)$$

$$\text{AN : } Q_{41} = \frac{29}{1.4} \times (330 - 1120) = -16 \text{ KJ}$$

5. En appliquant le premier principe, le travail fourni par le moteur au cours d'un cycle :

$$\Delta U_{\text{cycle}} = W_{\text{cycle}} + Q_{\text{cycle}} \text{ et } \Delta U_{\text{cycle}} = 0$$

$$W_{\text{cycle}} = -Q_{\text{cycle}}$$

$$W_{\text{cycle}} = -(Q_{12} + Q_{23} + Q_{34} + Q_{41}) \text{ or } Q_{12} = Q_{34} = 0$$

$$W_{\text{cycle}} = -(Q_{23} + Q_{41})$$

$$\text{AN : } W_{\text{cycle}} = -(38 - 16) = -22 < 0$$

6. Le rendement  $\eta$  de ce moteur thermique :

$$\eta = \frac{|W_{\text{cycle}}|}{Q_{23}}$$

AN :

$$\eta = \frac{|-22|}{38} = 57\%$$

