

---

## Exercices thermodynamique premier et deuxième principe

---

### **Exercice 0 énergie interne - travail – chaleur ; Changement d'état**

**q. 1.** Un  $m^3$  d'air (assimilé à un gaz parfait) sous une pression  $P_1 = 10$  bar subit une détente à température constante ; la pression finale est de  $P_2 = 1$  bar. Déterminer le travail et le transfert thermique échangés par le gaz avec le milieu extérieur au cours de cette détente.

**q. 2.** Un récipient fermé par un piston mobile renferme 2 g d'hélium (gaz parfait monoatomique) dans les conditions  $(P_1, V_1)$ . On opère une compression adiabatique de façon réversible qui amène le gaz dans les conditions  $(P_2, V_2)$ . Sachant que  $P_1=1$  bar ;  $V_1=10L$  ;  $p_2=3$  bar. Déterminer :

- le volume final  $V_2$
- le travail échangé par le gaz avec le milieu extérieur
- la variation d'énergie interne du gaz
- déduire la variation de température du gaz sans calculer sa température initiale.

On donne :  $\gamma = C_p/C_v = 5/3$  ;  $R = 8,32 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

**q. 3.** Calculer la variation d'énergie interne de chacun des systèmes suivants :

- un système吸orbe  $Q = 2\text{kJ}$  tandis qu'il fournit à l'extérieur un travail  $W = 500 \text{J}$ .
- un gaz maintenu à volume constant cède  $Q = 5\text{kJ}$ .
- la compression adiabatique d'un gaz s'accomplice par un travail  $W = 80 \text{J}$

---

### **Exercice 1 détente irréversible d'un gaz dans l'atmosphère ( énergie interne, enthalpie, entropie)**

On considère un gaz parfait diatomique qui occupe un récipient calorifugé de volume  $V_0$  sous la pression  $p_0$  à la température  $T_0$ .  $p_0$  est la pression à l'extérieure du récipient. On ouvre le robinet et le gaz se détend irréversiblement dans l'atmosphère.  $\gamma = 1,4 = 7/5$

1. Exprimer la température  $T_1$  du gaz résiduel en fonction de  $T_0$ .
2. Exprimer la variation de l'énergie interne en fonction de  $p_0, V_0, T_0$  et  $\gamma$ .
3. Même question pour l'enthalpie et l'entropie

---

### **Exercice 2 cycle décrit par un gaz parfait : rendement**

Une mole de gaz parfait subit les transformations réversibles suivantes :

état (1) à état (2) compression adiabatique ; état (2) à état (3) dilatation à pression constante ; état (3) à état (4) détente adiabatique ; état (4) à état (1) refroidissement à volume constant. Chaque état est défini par la pression  $P_i$ , la température  $T_i$  et le volume  $V_i$  ( $i$  variant de 1 à 4).

On appelle  $\gamma$  le rapport des chaleurs molaires  $C_p/C_v$ . On définit  $a = V_1/V_2$  et  $b = V_4/V_3$ .

1. Représenter sommairement le cycle sur un diagramme de Clapeyron.
  - Donner les expressions de la pression, du volume et de la température pour les états (2), (3) et (4), en fonction de  $P_1, V_1, T_1$ ,  $a$  et  $b$ .
  - Calculer numériquement ces valeurs.
2. Calculer les travaux et chaleurs échangés pour toutes les transformations subies. Préciser notamment le sens des échanges.
3. Proposer une expression pour le rendement  $\eta$  d'un moteur fonctionnant suivant ce cycle, en fonction des travaux et chaleurs échangés.
  - Donner l'expression du rendement  $\eta$  en fonction de  $\gamma$ ,  $a$  et  $b$ .
  - Calculer  $\eta$  et vérifier la valeur trouvée.

Données :  $\gamma = 1,4$  ;  $P_1 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  ;  $a = 9$  ;  $T_1 = 300 \text{ K}$  ;  $b = 3$  ;  $C_v = 20,8 \text{ J/K/mol}$

---

### **Exercice 5 Evolution polytropique de l'unité de masse d'un gaz parfait. (non corrigé)**

Une évolution polytropique est définie par la relation :  $T ds = c dT$  ( $s$  étant l'entropie massique,  $T$  la température thermodynamique absolue) où  $c$  est la capacité thermique vraie de cette évolution, on supposera  $c$  constante.

**P1)** Démontrer qu'au cours d'une telle évolution on a :  $P \cdot v^k = \text{constante}$ . Exprimer  $k$  en fonction des capacités thermiques  $c_v$ ,  $c_p$  et  $c$ .

**P2)** Préciser les valeurs à donner à l'exposant  $k$ , et celle de  $c$  correspondantes pour que l'évolution polytropique représente une isotherme, une isobare, une isochore ou une isentropique.

**P3)** Donner l'allure d'une évolution polytropique en diagramme ( $T$ ,  $s$ ): on supposera  $c > 0$ . Préciser la nature de cette courbe. Si l'on considère une évolution polytropique réversible où la température évolue de  $T_1$  à  $T_2 > T_1$ , représenter graphiquement, en diagramme ( $T$ ,  $s$ ), la quantité de chaleur massique, notée  $q_{1-2}$ , échangée lors de cette évolution.  
Données numériques:  $c_v = 1,5 \text{ R}$ ,  $c_p = 2,5 \text{ R}$  et  $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

---

### Exercice 6 entropie échangée- entropie créée

Calorimétrie : Un vase calorifugé contient  $m_1=200\text{g}$  de liquide de capacité thermique massique  $c_1=2850 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  à la température  $t_1=20^\circ\text{C}$ . On y plonge rapidement un bloc de cuivre de masse  $m_2=250\text{g}$  ( $c_2=390 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) pris initialement à la température  $t_2=80^\circ\text{C}$ . La capacité thermique du récipient est  $C_3=150 \text{ JK}^{-1}$  est soigneusement refermé.

1. Déterminer la température d'équilibre.

2. Calculer la variation globale d'entropie au cours de cette opération.

3. On retire le couvercle et on laisse l'ensemble se refroidir lentement jusqu'à la température ambiante  $20^\circ\text{C}$ . Quelle est la variation d'entropie de l'ensemble {vase + liquide + cuivre}. Quelle est la variation d'entropie de l'ensemble {vase + liquide + cuivre + milieu extérieur}. Conclure

---

### EXERCICE 7 Compression et détente d'un gaz parfait avec travail extérieur

On considère un cylindre d'axe vertical, de section intérieure  $S = 100 \text{ cm}^2$ . Dans ce cylindre peut coulisser un piston de masse  $M = 51\text{kg}$ . La pression atmosphérique extérieure est  $P^0 = 10^5 \text{ Pa}$ . Dans tout le problème, on néglige les pertes d'énergie par frottements. Tous les corps à l'état gazeux pourront être modélisés comme des gaz parfaits.

Dans un état initial A un opérateur maintient le piston de telle sorte qu'il limite dans le cylindre un espace libre de hauteur  $h_0 = 1 \text{ m}$ , rempli de gaz parfait monoatomique à la température  $t_0 = 0$  et à la pression  $P^0 = 10^5 \text{ Pa}$ . On prendra :  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ .

On revient à l'état initial A, le cylindre ne contenant plus que le gaz parfait monoatomique. Sans se préoccuper, maintenant, du mode opératoire, on réalise le cycle de transformations réversibles suivant :

compression adiabatique permettant d'atteindre une pression de  $1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ; puis refroidissement à pression constante jusqu'à  $t_0 = 0$ : enfin, détente isotherme permettant de retrouver l'état A.

1. Représenter, aussi exactement que possible, le cycle dans un plan de coordonnées ( $P$ ,  $V$ ).

2. Calculer le travail total échangé entre le gaz et le milieu extérieur au cours d'un cycle. Ce cycle pouvant être réalisé avec la seule source de chaleur à la température  $t_0$ , montrer que le signe de ce travail satisfait au second principe de la thermodynamique quant à l'existence de machines monothermes.

3. On envisage le cycle décrit dans le sens inverse du sens précédent. Calculer le rendement thermique de la machine fonctionnant réversiblement selon ce cycle. Si l'on voulait réaliser ce cycle à l'aide de deux sources de chaleur; quelles seraient nécessairement les températures de ces deux sources ?

Quel serait le rendement de Carnot correspondant ?

---

### CORRIGÉ Exercices thermodynamique premier et deuxième principe

#### corrigé 0 énergie interne - travail - chaleur

isotherme : à n et T constante  $p_1V_1 = p_2V_2$  d'où  $V_2 = V_1 p_1 / p_2 = 10 \text{ m}^3$ .

travail élémentaire des forces de pression  $-pdV = -nRT / V dV = -nRT d(\ln V)$ ; intégrer entre  $V_1$  et  $V_2$ .

$$W_1 = - \int_1^2 P dV = -nRT \int_1^2 \frac{dV}{V} = -nRT \int_1^2 d(\ln V) = -nRT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \text{ avec } nRT = p_1V_1 = p_2V_2 \text{ et } p_1 = 10^6 \text{ Pa} ; V_1 = 1 \text{ m}^3 ;$$

$V_2 / V_1 = 10$ ;  $W = -10^6 \ln 10 = -2,3 \cdot 10^6 \text{ J}$ . L'énergie interne d'un gaz parfait dépend que de la température; si  $T = \text{cte}$  alors  $\Delta U = 0$  or  $\Delta U = W + Q$  donc  $Q = -W = 2,3 \cdot 10^6 \text{ J}$

adiabatique :  $p_1V_1^\gamma = p_2V_2^\gamma$  s'écrit  $(V_2 / V_1)^\gamma = p_1 / p_2 = 0,333$  avec  $\gamma = 5/3$ ;  $V_2/V_1 = 0,3333^{(3/5)} = 0,517$

$V_2 = 5,17 \text{ L}$ . travail élémentaire des forces de pression  $-pdV$  avec  $p = \text{Cte} / V^\gamma$ . intégrer entre  $V_1$  et  $V_2$ .

$$W = -Cte \int_1^2 \frac{dV}{V^\gamma} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{\gamma - 1}$$

pression en pascal, volume en  $\text{m}^3$ .  $W = (3 \cdot 10^5 * 5,17 \cdot 10^{-3} - 10^5 * 10^{-2}) / (1,666 - 1) = 2125 \text{ J}$ .

adiabatique donc  $Q = 0$ ;  $\Delta U = W + Q = W$ ;  $\Delta U = nR \Delta T$

avec  $n = 2$  / masse molaire hélium =  $2/4 = 0,5$ :  $\Delta T = 2125 / (0,5 * 8,32) = 511 \text{ K}$ .

variation interne d'énergie :  $\Delta U = W + Q$ ; absorbe 2000 J donc  $Q = +2000 \text{ J}$ ; fournit un travail donc  $W = -500 \text{ J}$ ;

$\Delta U = +1500 \text{ J}$ .

volume constant donc pas de travail des forces de pression  $W = 0$ ; cède donc  $Q = -5000 \text{ J}$ ;  $\Delta U = \underline{-5000 \text{ J}}$ . adiabatique donc  $Q = 0$  et  $W = 80 \text{ J}$ ;  $\Delta U = \underline{+80 \text{ J}}$ .

### **corrigé 1 détente irréversible d'un gaz dans l'atmosphère**

Travail reçu par le gaz: travail élémentaire reçu par le gaz lors d'une transformation élémentaire quelconque  $\delta W = -p_0 dV$  d'où  $W = -p_0 (V_1 - V_0)$ ,  $V_1$  étant le volume du gaz détendu dans l'atmosphère sous la pression  $p_0$ . équation des gaz parfait: initial :  $3p_0V_0 = nRT_0$ .(1); final :  $p_0V_1 = nRT_1$ .(2); (2) divisé par (1) donne  $V_1 = 3V_0 T_1 / T_0$ . rapport dans l'expression du travail:  $W = -p_0 V_0 (3T_1 / T_0 - 1)$

exprimer de 2 manières différentes l'énergie interne :  $\Delta U = W + Q$  avec  $Q = 0$ , système calorifugé.

$$\Delta U = -p_0 V_0 (3T_1 / T_0 - 1) \quad (3) \quad \Delta U = nC_{Vm} (T_1 - T_0) \quad n = 3p_0 V_0 / (RT_0) \text{ et } C_{Vm} = R / (\gamma - 1) = 2,5 \text{ R}$$

$$\Delta U = 3p_0 V_0 / [T_0(\gamma - 1)] (T_1 - T_0) = 3p_0 V_0 / (\gamma - 1) (T_1 / T_0 - 1) \quad (4)$$

$$\text{écrire (3) = (4) d'où : } -3T_1 / T_0 + 1 = 3 / (\gamma - 1) (T_1 / T_0 - 1)$$

$$T_1 = T_0 (\gamma + 2) / (3\gamma) = 17 / 21 T_0. \text{ la température finale du gaz diminue.}$$

énergie interne, enthalpie:

$$3T_1 / T_0 = 17 / 7; \quad 3T_1 / T_0 - 1 = 10 / 7; \quad \Delta U = -10p_0 V_0 / 7; \quad \Delta H = \gamma \Delta U = -2p_0 V_0.$$

entropie:  $dU = TdS - pdV = nC_{Vm}dT$ ;  $dS = nC_{Vm} / T dt + p/T dv = nC_{Vm} / T dt + nR/V dv$

pour la transformation globale:  $\Delta S = nC_{Vm} \ln(T_1/T_0) + nR \ln(V_1/V_0)$ ,  $n = 3p_0 V_0 / (RT_0)$ ;  $V_1/V_0 = 3T_1 / T_0 = 17 / 7$ ;  $C_{Vm} = 2,5 \text{ R}$ .  $\Delta S = 3p_0 V_0 / T_0 [2,5 \ln(17/21) + \ln(17/7)]$

### **corrigé 2 cycle décrit par un gaz parfait : rendement**

compression adiabatique:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \text{ soit } P_2 = P_1 (V_1 / V_2)^\gamma = P_1 a^\gamma. P_2 = 10^5 * 9^{1,4} = \underline{2,167 \cdot 10^6 \text{ Pa.}}$$

$$V_1 / V_2 = a \text{ d'où } V_2 = V_1 / a. \text{ avec } P_1 V_1 = RT_1 \text{ soit } V_1 = 8,31 * 300 / 10^5 = 0,025 \text{ m}^3. \text{ et } V_2 = RT_1 / (aP_1) = 0,025 / 9 = \underline{2,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}.$$

$$P_2 V_2 = RT_2 \text{ soit } T_2 = P_1 a^\gamma RT_1 / (aRP_1); T_2 = a^{\gamma-1} T_1 = 9^{0,4} * 300 = \underline{722,4 \text{ K.}}$$

dilatation à  $P = \text{Cte}$ :  $P_3 = P_2$ ;  $V_3 = 8,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  (calcul ci dessous)

$$P_3 V_3 = RT_3 \text{ d'où } T_3 = P_2 V_3 / R = P_1 a^\gamma V_1 / (Rb); T_3 = 10^5 * 9^{1,4} * 0,025 / (8,31 * 3) = \underline{2176 \text{ K.}}$$

détente adiabatique:  $P_3 V_3^\gamma = P_4 V_4^\gamma$  soit  $P_4 = P_3 (V_3 / V_4)^\gamma = P_3 / b^\gamma = P_1 (a/b)^\gamma$ ;  $P_4 = 10^5 * 3^{1,4} = \underline{4,65 \cdot 10^5 \text{ Pa.}}$

$$V_4 / V_3 = b \text{ d'où } V_3 = V_4 / b = V_1 / b = 0,025 / 3 = \underline{8,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$\text{avec } P_4 V_4 = RT_4 \text{ soit } T_4 = P_4 V_1 / R = P_1 (a/b)^\gamma V_1 / R. T_4 = 10^5 * 3^{1,4} * 0,025 / 8,31 = \underline{1402 \text{ K.}}$$

travail et chaleur échangés (1) --> (2) : adiabatique, donc pas d'échange de chaleur avec l'extérieur

$$\text{travail : } W_{12} = (P_2 V_2 - P_1 V_1) / (\gamma - 1); W_{12} = (21,67 \cdot 10^5 * 2,77 \cdot 10^{-3} - 10^5 * 0,025) / 0,4 = \underline{8756 \text{ J. (reçu)}}$$

travail et chaleur échangés (2) --> (3) : pression constante donc  $W_{23} = -P_2 (V_3 - V_2)$

$$W_{23} = -21,67 \cdot 10^5 (8,33 - 2,77) \cdot 10^{-3} = \underline{-12048 \text{ J. (cédé à l'extérieur)}}$$

$$\text{variation d'énergie interne du gaz } C_v (T_3 - T_2); \Delta U = 20,8 (2176 - 722,4) = \underline{30235 \text{ J}}$$

$$Q_{23} = \Delta U - W_{23} = 30235 - (-12048) = \underline{42283 \text{ J (reçu)}}$$

Travail et chaleur échangés (3) --> (4) : adiabatique, donc pas d'échange de chaleur avec l'extérieur

$$\text{travail : } W_{34} = (P_4 V_4 - P_3 V_3) / (\gamma - 1)$$

$$W_{34} = (4,65 \cdot 10^5 * 25 \cdot 10^{-3} - 21,67 \cdot 10^5 * 8,33 \cdot 10^{-3}) / 0,4 = \underline{-16065 \text{ J. (perdu)}}$$

travail et chaleur échangés (4) --> (1) : volume constant donc  $W_{41} = 0$

la chaleur échangée est égale à la variation d'énergie interne du gaz :  $Q_{41} = C_v (T_1 - T_4)$

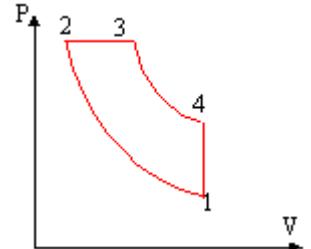
$$Q_{41} = 20,8 (300 - 1402) = \underline{-22922 \text{ J. (cédé à l'extérieur)}}$$

rendement: il représente le taux de conversion en travail de l'énergie thermique reçue.

$$\text{énergie thermique reçue} = 42283 \text{ J; travail fourni - travail reçu : } -16065 - 12048 + 8756 = -19357 \text{ J}$$

$$\text{rendement} = -(-19357) / 42283 = \underline{0,46}. \text{ autre méthode : } 1 + Q_2 / Q_1 \text{ avec}$$

$$Q_1 \text{ chaleur reçue et } Q_2 \text{ chaleur cédée. } 1 + (-22922) / 42283 = 1 - 0,54 = 0,46.$$



### **corrigé 6 entropie échangée- entropie créée**

Le transfert thermique s'effectue sous pression constante: rechercher la variation d'enthalpie  $\Delta H$

le vase est calorifugé :  $\Delta H = 0$ ; il n'y a pas de changement d'état physique :  $\sum m_i c_i \Delta T_i = 0$

on effectue des différences de température, on peut conserver les degrés Celsius.

liquide :  $m_1 c_1 (T_e - T_1) = 0,2 * 2850 (T_e - 20) = 570 T_e - 11400$ .

cuivre :  $m_2 c_2 (T_e - T_2) = 0,25 * 390 (T_e - 80) = 97,5 T_e - 7800$ .

vase :  $C_3(T_e - T_1) = 150(T_e - 20) = 150T_e - 3000$ .

faire la somme, résoudre l'équation à une inconnue  $T_e$

$$570T_e - 11400 + 97,5T_e - 7800 + 150T_e - 3000 = 0, \quad 817,5T_e = 22200, \quad T_e = 27,16^\circ\text{C}.$$

variation d'entropie lors du refroidissement du cuivre (phases condensées incompressibles)

$$\Delta S = \sum m_i c_i \ln [T_e / T_i]$$

on fait des rapports de températures, mettre les températures en kelvin

$$\text{liquide} : m_1 c_1 \ln(T_e / T_1) = 0,2 * 2850 \ln(300,16 / 293) = 13,76 \text{ J K}^{-1}$$

$$\text{cuivre} : m_2 c_2 \ln(T_e / T_2) = 0,25 * 390 \ln(300,16 / 353) = -15,8 \text{ J K}^{-1}$$

$$\text{vase} : C_3 \ln(T_e / T_1) = 150 \ln(300,16 / 293) = 3,62 \text{ J K}^{-1}$$

total : 1,58 J K<sup>-1</sup>. valeur positive donc entropie créée lors d'une transformation irréversible.

même méthode de calcul de la variation d'entropie du système { vase + cuivre + liquide }

entropie échangée entre le système et l'extérieur

$$(m_1 c_1 + m_2 c_2 + C_3) \ln[T_1 / T_e] = 817,5 \ln(293 / 300,16) = -19,73 \text{ J K}^{-1}$$

variation d'entropie lors du transfert thermique du système vers l'extérieur

$$\Delta S = -\Delta Q_p / T_1 = \sum m_i c_i \Delta T_i / T_1 = -817,5 (293 - 300,16) / 293 = 19,977 \text{ J K}^{-1}$$

$$\text{variation d'entropie de l'univers} : 19,977 - 19,73 = 0,24 \text{ J K}^{-1}$$

Une valeur positive donc entropie créée lors d'une transformation irréversible.

## SOLUTION 7 Compression et détente d'un gaz parfait avec travail extérieur

1. Première partie Voir chapitre Premier principe 2. Deuxième partie Voir chapitre Premier principe

3. Troisième partie Voir chapitre Changement d'état

### 4. Quatrième partie

4.1. état A ( $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_0 = 10 \text{ L}$ ,  $T_0 = 273 \text{ K}$ ); état B ( $P_1 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_1 = 7,84 \text{ L}$ ,  $T_1 = 321 \text{ K}$ ); état C ( $P_1 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V'_1 = 6,67 \text{ L}$ ,  $T = 273 \text{ K}$ )

Transformation AB : adiabatique réversible; CA : isotherme réversible.

$$4.2. W = W_1 + W_2 + W_3 \text{ avec } W_1 = - \int_A^B P dV ; \quad W_2 = - \int_B^C P dV ;$$

$$W_1 = - \int_C^A P dV . \quad W_2 = P_1 (V_B - V_C) = 175,5 \text{ J} .$$

$$W_1 = -P_0 V_0^\gamma \int_A^B \frac{dV}{V^\gamma} = \frac{P_1 V_1 - P_0 V_0}{\gamma - 1} = 264 \text{ J} ;$$

$$W_3 = P_0 V_0 \int_A^C \frac{dV}{V} = P_0 V_0 \ln \frac{V_C}{V_A} = -405 \text{ J} \text{ soit } W = 34,5 \text{ J} .$$

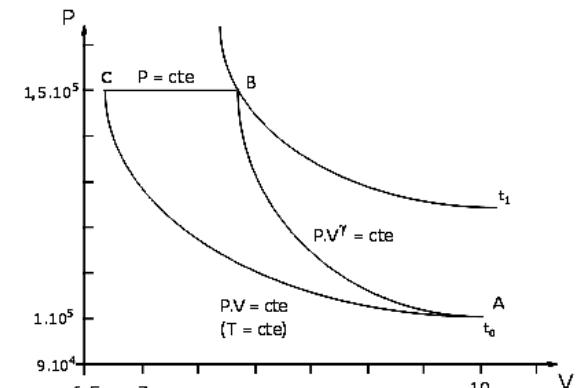


figure 1

Cela vérifie le second principe : au cours d'un cycle monotherme le système reçoit nécessairement du travail ( $W > 0$ ) car il est impossible de fabriquer un moteur cyclique avec une seule source de chaleur.

4.3. Le cycle est maintenant décrit en sens inverse.

AC : compression isotherme réversible; le système reçoit du travail et fournit de la chaleur.

CB : chauffage isobare; le système reçoit de la chaleur.

BA : détente adiabatique réversible; le système fournit du travail.

Une machine thermique fonctionnant réversiblement suivant ce cycle pourrait théoriquement fournir 34,5 J en travail.

La chaleur fournie l'est au cours de la transformation CB et vaut  $Q = mC_p(T_B - T_C)$  soit

$$Q = \frac{10^5 \cdot 10^{-2}}{8,32 \cdot 273} \cdot \frac{5}{2} \cdot 8,32 \cdot (321 - 273) = 441,7 \text{ J} . \quad \text{Le rendement est : } \eta = \frac{W}{Q} = 7,8\% .$$

Si le système fonctionnait avec deux sources, celles-ci auraient nécessairement pour températures  $T_0 = 273 \text{ K}$  et  $T_1 = 321 \text{ K}$ .

$$\text{Le rendement de Carnot serait } \eta' = 1 - \frac{273}{321} = 15\%$$