

TD00 : Thermodynamique première année

Lois de la thermodynamique

ThermoSup080. Compression (Adapté, oral ESM 2018, **)

On considère n_0 moles de gaz parfait enfermées dans une enceinte limitée par un piston mobile, les échanges thermiques étant possibles avec l'extérieur à la température T_0 constante. Initialement la température est T_0 , le volume V_0 et la pression P_0 .

On comprime alors le gaz en suivant deux protocoles différents :

- premier protocole : on ajoute brutalement une masse M sur le piston qui revient à faire passer la pression extérieure sur le piston de P_0 à $2P_0$;
- second protocole : on ajoute cette même masse mais par ajouts successifs de petits grains de sable.

1. Déterminer l'état final du système.
2. Pour chacun des deux protocoles, déterminer : la variation d'énergie interne ΔU , le travail W et le transfert thermique Q reçus par le gaz au cours de cette évolution. Commenter les signes des grandeurs.

Pour un gaz parfait, on rappelle que la variation d'entropie entre deux états d'équilibre i et f a pour expression :

$$\Delta S = n_0 C_{vm} \ln \left(\frac{T_f}{T_i} \right) + n_0 R \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)$$

3. Déterminer pour chacun des deux protocoles la variation d'entropie, l'entropie échangée et l'entropie créée.

Commentaire.

Réponses : 1 : $T_f = T_0$, $P_f = 2P_0$, $V_f = V_0/2$; 2 : $\Delta U = 0$, $W_1 = n_0 RT_0 = -Q_1$, $W_2 = n_0 RT_0 \ln(2) = -Q_2$; 3 : $\Delta S = -n_0 R \ln(2)$, $S_{e,1} = -n_0 R$, $S_{e,2} = -n_0 R \ln(2)$, $S_{c,1} = n_0 R [1 - \ln(2)] > 0$, $S_{c,2} = 0$

ThermoSup028. Équilibre eau-glace (*)

Un calorimètre thermiquement isolé et de capacité thermique négligeable contient une masse $M_L = 1,00$ kg d'eau liquide, initialement à la température $t_2 > t_0 = 0^\circ\text{C}$. Une masse $M_s = 1,00$ kg de glace, initialement à la température $t_1 = -20^\circ\text{C}$, est ajoutée dans le calorimètre.

Données : $l_f(P_0 = 1 \text{ bar}, t_0) = 334 \text{ kJ.kg}^{-1}$ enthalpie massique de fusion de la glace ; $c_g = 2,09 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ capacité thermique de la glace (supposée constante),

$c_l = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ capacité thermique de l'eau (supposée constante).

Déterminer et calculer la température minimale t_{2min} de la masse M_L d'eau liquide pour laquelle, à l'équilibre, toute l'eau est sous forme liquide.

Réponses : $t_2 = 90^\circ\text{C}$

ThermoSup058. Solides mis en contact (**)

On considère deux solides S_1 et S_2 de capacités thermiques C_1 et C_2 aux températures T_1 et T_2 .

On les met en contact dans un calorimètre de capacité thermique négligeable.

1. Donner l'expression de T_{eq} la température finale du système composé des deux solides et du calorimètre.
2. Calculer ΔS la variation d'entropie du système.
3. Si $C = C_1 = C_2$ donner le signe de ΔS .

Réponses : 1 : $T_F = \frac{C_1 T_1 + C_2 T_2}{C_1 + C_2}$; 2 : $\Delta S = C_1 \ln \left(\frac{T_f}{T_1} \right) + C_2 \ln \left(\frac{T_f}{T_2} \right)$;

3 : $\Delta S = C \ln \left(\frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1 T_2} \right) \geq 0$

Applications aux machines thermiques

ThermoSup073. Énoncé de Kelvin (**)

À l'aide des principes de la thermodynamique, démontrer l'énoncé historique de Kelvin du deuxième principe :

Il est impossible de réaliser un moteur cyclique monotherme

ThermoSup074. Étude d'un congélateur (**)

Un congélateur est placé dans une pièce à la température de 20°C (supposée constante). Pour maintenir l'intérieur de ce congélateur à la température constante de -19°C , il est nécessaire d'en extraire par transfert thermique, 400 kJ par heure. Cette opération est supposée se faire de manière **réversible**.

1. Calculer le transfert thermique fourni à la pièce en une heure par le fluide caloporteur.
2. Calculer la puissance moyenne du compresseur pour réaliser cette opération.
3. Définir puis calculer l'efficacité de cette machine thermique.

Réponses : 1 : La pièce reçoit 461 kJ par heure; 2 : $\mathcal{P} = 17 \text{ W}$; 3 : $\eta = 6,5$

ThermoSup031. Climatiseur et pseudo-sources (***)

Un local de capacité thermique totale $C = 4,0 \times 10^3 \text{ kJ.K}^{-1}$ est initialement à la température $T_0 = 32^\circ\text{C}$ de l'air extérieur. Un climatiseur fonctionnant de manière ditherme réversible entre l'air extérieur (à température constante) et le local (de température variable) ramène la température de celui-ci à $T_1 = 20^\circ\text{C}$ en une durée $\Delta t = 1,0 \text{ h}$.

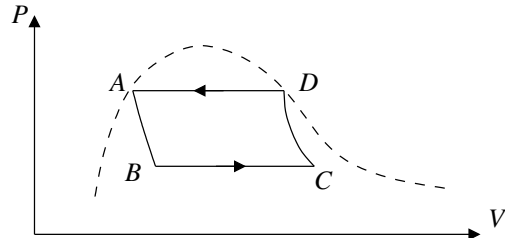
Au cours d'un cycle élémentaire où la température du local varie de $T(t)$ à $T(t) + dT$, le fluide circulant dans le climatiseur reçoit un transfert thermique δQ_1 du local et δQ_2 de l'air extérieur à la température T_2 constante.

1. Lors de l'évolution élémentaire et en utilisant le premier principe, trouver une relation entre C , dT et δQ_1 .
2. En utilisant le caractère réversible d'un cycle élémentaire, trouver une relation entre T , T_2 , δQ_1 et δQ_2 .
3. En déduire les expressions des quantités de chaleur totales Q_1 et Q_2 échangées durant le refroidissement du local de la température T_0 à T_1 .
4. Déterminer alors le travail total W fourni au climatiseur. Faire l'application numérique.
5. Quelle est la puissance électrique moyenne P fournie au climatiseur ?

Réponses : 1 : $CdT = -\delta Q_1$; 2 : $0 = \frac{\delta Q_1}{T} + \frac{\delta Q_2}{T_0}$; 3 : $Q_1 = C(T_0 - T_1)$; $Q_2 = CT_0 \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right)$; 4 : $W = 970 \text{ kJ}$; 5 : $P = 2,7 \times 10^2 \text{ W}$

ThermoSup063. Machine frigorifique (***)

Une machine frigorifique fonctionne selon le cycle ci-dessous de transformations réversibles $DABCD$ d'un fluide.



- DA liquéfaction isotherme à T_1 ;
- AB détente isentropique qui amène le fluide dans l'état de température et de titre massique en vapeur x_1 ;
- BC vaporisation isotherme partielle jusqu'à l'état C de titre massique en vapeur x_2 ; C est situé sur la courbe isentropique passant par D ;
- s_0 et s_1 sont respectivement les entropies massiques du liquide saturant à T_0 et T_1 ;

— l_0 et l_1 sont respectivement les enthalpies massiques de vaporisation à T_0 et T_1 .

1. Déterminer les valeurs des titres massiques en vapeur x_1 et x_2 en fonction de s_0 , s_1 , T_0 , T_1 , l_0 et l_1 .
2. Exprimer les transferts thermiques q_{BC} et q_{DA} reçus du milieu extérieur par l'unité de masse du fluide lors des transformations isothermes BC et DA .
3. Exprimer le travail reçu par l'unité de masse du fluide au cours du cycle.
4. Le système précédent constitue une machine frigorifique. Quelles sont les températures respectivement des sources froide et chaude ? Déterminer l'efficacité de cette machine.

Réponses : 1 : $x_1 = \frac{T_0(s_1 - s_0)}{l_0}$, $x_2 = \frac{l_1}{l_0} \times \frac{T_0}{T_1} + \frac{T_0(s_1 - s_0)}{l_0}$; 2 : $q_{BC} = l_1 \frac{T_0}{T_1}$; $q_{DA} = -l_1$; 3 : $w = l_1 \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right)$; 4 : $\eta = \frac{T_0}{T_1 - T_0}$

Extrait sujet de concours

ThermoSup078. Moteur à combustion (CCP, PSI, 2018, **)

On considère l'étude thermodynamique du moteur PSA EB2. Ce moteur, connu sous sa dénomination commerciale 1,2 Puretech, équipe en particulier les Peugeot 108, 208 et 2008, les Citroën C1, C3, C4 Cactus ainsi que la DS3. Compte tenu de la faible proportion d'essence dans le mélange air-essence, celui-ci sera assimilé uniquement à l'air qu'il contient, lui-même considéré comme un gaz parfait diatomique.

1. Déterminer, à l'aide de la cylindrée et du rapport volumétrique de compression, les valeurs numériques exprimées en cm^3 des volumes V_1 et V_2 correspondant respectivement au point mort haut et au point mort bas.

On rappelle le principe d'un cycle de Beau de Rochas :

- AB : admission isobare et isotherme du mélange air-essence ;
- BC : compression adiabatique réversible ;
- CD : compression isochore ;
- DE : détente adiabatique réversible ;
- EB : refroidissement isochore ;
- BA : échappement isobare et isotherme.

2. Tracer dans un diagramme de Watt (pression en ordonnées, volume d'un des trois cylindres en abscisses) l'allure du cycle idéalisé, appelé cycle de Beau de Rochas et décrit dans le document. On veillera à faire figurer les points

A, B, C, D et E.

Le cycle réel est un peu différent du cycle idéalisé. Expliquer, par une argumentation phrasée de moins de 50 mots, en quoi le cycle réel diffère du cycle idéal.

Dans la suite du problème, le modèle adopté est celui du cycle idéal décrit à pleine puissance par le moteur EB2 et synthétisé dans le tableau suivant.

| Point | A | B | C | D | E |
|------------------------|-----|-----|-------|-------|------|
| P (bar) | 1 | 1 | P_C | P_D | 4 |
| V (cm ³) | 40 | 440 | 40 | 40 | 440 |
| T (K) | 300 | 300 | T_C | 2820 | 1193 |

- Déterminer les valeurs manquantes : P_C , P_D , T_C .
- Déterminer la valeur numérique du travail W_{BC} reçu par le gaz au cours de la compression BC .
- Déterminer le transfert thermique Q_{CD} reçu par le gaz au cours de l'explosion CD .
- On donne : $|W_{DE}| = 596$ J et $|Q_{EB}| = 328$ J. Déterminer la valeur numérique du rendement R_{dt} du cycle. On remarquera qu'il s'agit d'un rendement purement thermodynamique pour un cycle idéal. Il ne tient pas compte des considérations mécaniques. En pratique, le rendement global est moins bon et dépend fortement du point de fonctionnement (couple-vitesse) considéré. Ce résultat permet néanmoins de comparer des cycles et de poser des limites.
- Reconstruire l'expression du rendement d'un cycle de Carnot dont les températures extrémales sont : T_{fr} pour la source froide et T_{ch} pour la source chaude. Comparer le rendement R_{dt} trouvé précédemment avec celui d'un cycle de Carnot pour lequel $T_{fr} = 300$ K et $T_{ch} = 2820$ K. Conclure.
- Ce cycle est-il compatible avec la puissance maximale de 82 ch à 5750 tr/min annoncée par le constructeur ? On remarquera qu'il faut deux tours de vilebrequin pour effectuer un cycle thermodynamique.
- On supposera que ce cycle correspond aussi à celui décrit par une Peugeot 108 lors d'une utilisation autoroutière effectuée à la vitesse stabilisée de 130 km/h, le moteur tournant alors au régime de 3600 tr/min. Évaluer dans ces conditions d'utilisation la consommation d'essence exprimée en L/100 km, ainsi que le rejet de CO₂ exprimé en g/km. Commenter.

Données :

→ **capacités thermiques du mélange :**

— relation de Mayer : $C_{pm} - C_{vm} = R$;

— $\gamma = \frac{C_{pm}}{C_{vm}} = 1,4$.

→ **Caractéristiques techniques du moteur PSA EB2**

— architecture : 3 cylindres en ligne ;

— puissance maximale : 82 ch à 5750 tr/min ;

— rapport volumétrique de compression : $\delta = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}} = 11$;

— cylindrée : 1199 cm³.

On rappelle que la cylindrée d'un moteur à combustion interne correspond au volume d'air aspiré par l'ensemble des cylindres du moteur lors un cycle correspondant au passage du point mort haut au point mort bas.

→ **Caractéristiques d'une Peugeot équipée du moteur EB2 en consommation mixte**

— donnée constructeur : 4,3 L/100 km ;

— essai « Auto Plus » $n^{\circ}1450$ 5,7 L/100 km ;

— rejet moyen de CO₂ donné par constructeur : 99 g/km.

→ **Conversion d'unité, masse volumique du carburant essence SP98**

— 1 ch = 735,4 W ;

— $\rho = 720$ kg · m⁻³.

→ **Combustion de l'octane**

— énergie libérée par la combustion de l'octane : 5070 kJ · mol⁻¹ ;

— masse molaire octane : 114 g · mol⁻¹ ;

— masse molaire dioxyde de carbone : 44 g · mol⁻¹.

Réponses : 1 : $V_1 = 40,0$ cm³, $V_2 = 440$ cm³ ; 3 : $P_C = 28,7$ bar, $P_D = 104$ bar, $T_C = 7,8 \times 10^2$ K ; 4 : $W_{BC} = \frac{P_C V_C - P_B V_B}{\gamma - 1} = 177$ J ; 5 : $Q_{CD} = \frac{P_D V_D - P_C V_C}{\gamma - 1} = 753$ J ;

6 : $R_{dt} = 44\%$; 7 : $r_{Carnot} = 1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}} = 89\%$; 8 : $\mathcal{P}_{max} = 60,2$ kW ;

9 : consommation : 5,9 L/100 km, rejet : 130 g/km