

TD de physique n°3 : Second principe de la thermodynamique

Notions et contenus	Capacités exigibles
Fonction d'état entropie ; entropie massique et entropie molaire. Entropie d'un gaz parfait, d'une phase condensée indilatable et incompressible. Second principe de la thermodynamique pour un système fermé. Entropie échangée, entropie créée, bilan d'entropie.	Interpréter qualitativement une augmentation de l'entropie d'un système isolé comme une perte d'information sur la connaissance de l'état du système à l'échelle microscopique. Exploiter l'expression fournie de la variation d'entropie entre deux états d'équilibre thermodynamique d'un gaz parfait ou d'une phase condensée indilatable et incompressible. Formuler un bilan d'entropie sous forme infinitésimale ou intégrale. Associer la création d'entropie au caractère réversible ou irréversible de la transformation.

Formulaire de thermodynamique

- Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
- Pour un gaz parfait :
 - Expression de la variation d'entropie : $\Delta S = n C_{v,m} \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) + n R \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$
 - Expression de la capacité thermique molaire à volume constant : $C_{v,m} = \frac{R}{\gamma - 1}$
où γ est le coefficient adiabatique ($\gamma = \frac{3}{2}$ pour un GP monoatomique)
 - Pour une transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait : $PV^\gamma = \text{constante}$
- Pour une phase condensée incompressible et indilatable, l'entropie ne dépend que de la température : $\Delta S = C \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right)$ où C est la capacité thermique de la phase considérée.

Exercice n°1 : Distinction entre compression monotherme et isotherme d'un gaz.

Un cylindre d'axe vertical est fermé à sa partie supérieure par un piston horizontal de section $S = 20 \text{ cm}^2$ et de masse négligeable sur lequel appuie un opérateur avec une force constante $f = 200 \text{ N}$. Les parois du cylindre et le piston sont parfaitement diathermes. L'ensemble est placé dans l'atmosphère de pression $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$ à la température $T_0 = 300 \text{ K}$. Le cylindre renferme un gaz parfait initialement sous la pression P_0 à la température T_0 et occupant le volume $V_0 = 1 \text{ L}$ dans le cylindre.

- a) Le piston descend brusquement. A l'équilibre calculer les paramètres du gaz P_1 , V_1 , T_1 , ΔU_1 et ΔS_1 .
- b) Que deviendraient ces résultats dans le cas d'une compression isotherme réversible amenant le gaz au même état final que dans le a) ?
- c) En calculant l'entropie échangée et l'entropie créée, montrer que l'on peut distinguer la transformation du a) de celle du b).

(Rép. : a) $P_1 = 2.10^5 \text{ Pa}$; $T_1 = 300 \text{ K}$; $V_1 = 0,5 \text{ L}$; $\Delta U_1 = 0$; $\Delta S_1 = -0,231 \text{ J.K}^{-1}$; b) inchangés ; c) $S_{\text{éch}} = Q/T_0 = -0,333 \text{ J.K}^{-1}$ et $S_{\text{cr}} = 0,102 \text{ J.K}^{-1}$ pour a) ; $S_{\text{éch}} = -0,231 \text{ J.K}^{-1}$ et $S_{\text{cr}} = 0$ pour b).)

Exercice n°2 : Solide en contact avec une source.

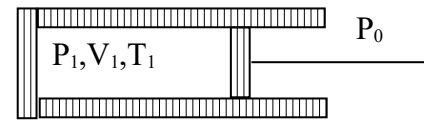
Un solide indéformable, de masse $m = 0,10 \text{ kg}$, de capacité thermique massique $c = 460 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ et en équilibre à la température $T_i = 350 \text{ K}$, est placé dans un thermostat à température $T_0 = 280 \text{ K}$.

Réaliser un bilan d'entropique. Quelle est la cause d'irréversibilité ?

Exercice n°3 : Détentes dans l'atmosphère.

Un gaz parfait ($\gamma = 7/5$) est placé dans un cylindre délimité par un piston (fig.). L'ensemble est parfaitement calorifugé. Dans

l'état initial $P_1 = 10$ bar. $V_1 = 10$ L et $T_1 = 273$ K et le piston est bloqué par une cale. Le système étant placé dans l'atmosphère ($P_0 = 1$ bar).



1°) On libère le piston et on le laisse évoluer librement.

- déterminer l'état final du gaz P_2, V_2 et T_2 et le travail échangé par le gaz avec l'extérieur.
- Calculer la variation d'entropie du gaz.

2°) On réalise cette fois la même expérience mais en retenant le piston une fois libéré de façon à le laisser évoluer très lentement vers l'état d'équilibre. Déterminer alors les paramètres d'état P, V, T finaux, le travail échangé et la variation d'entropie du gaz.

(Rép.: 1°) a) $P_2 = 1$ bar ; $V_2 = 74,3$ L ; $T_2 = 203$ K ; G.P. fournit 6,43 kJ ; b) $\Delta S = 46,3$ J.K⁻¹ ; 2°) 51,8 L ; G.P. fournit 12,1 kJ ; $\Delta S = 0$)

Exercice n°4 : Transfert thermique interne dans un cylindre divisé en deux compartiments.

Un cylindre horizontal, clos, de volume invariable, est divisé en deux compartiments, par un piston mobile, sans frottement. Les parois du cylindre et du piston sont imperméables à la chaleur. A l'état initial, les deux compartiments C_1 et C_2 contiennent un même volume $V_0 = 2$ L d'hélium (gaz parfait) de coefficient $\gamma = 5/3$, à la pression $P_0 = 1$ bar et à la température $T_0 = 273$ K. Le gaz du compartiment C_1 est chauffé très lentement à l'aide d'une résistance chauffante jusqu'à ce que la pression

- les pressions, volumes et températures dans C_2 puis C_1 dans l'état final.
- l'énergie fournie par la résistance chauffante.
- La variation d'entropie du gaz dans C_1 et du gaz dans C_2 .

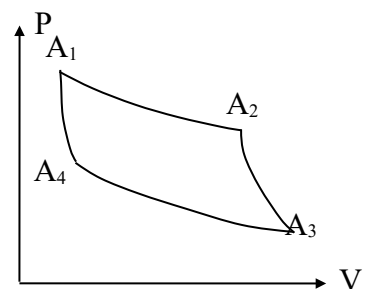
(Rép. : a) $V_1 = 2,97$ L ; $T_1 = 1214$ K ; $P_2 = 3$ bar ; $V_2 = 1,03$ L ; $T_2 = 424$ K ; b) $Q = 1,20 \cdot 10^3$ J ; c) $\Delta S_1 = 1,93$ J.K⁻¹ ; $\Delta S_2 = 0$ J.K⁻¹.)

Exercice n°5 : Cycle de Carnot.

1) Un système de n moles de gaz parfait décrit le cycle réversible $A_1 A_2 A_3 A_4 A_1$ composé de la suite de transformations ci-dessous en supposant $T_2 < T_1$:

$A_1 \xrightarrow{T_1 : \text{isotherme}} A_2 \xrightarrow{\text{adiabatique}} A_3 \xrightarrow{T_2 : \text{isotherme}} A_4 \xrightarrow{\text{adiabatique}} A_1$

Données : $n = 1$ mol ; $T_1 = 320$ K ; $T_2 = 285$ K ; $\gamma = 1,4$. En A_1 : $P_1 = 2 \cdot 10^5$ Pa ; en A_3 : $P_3 = 10^5$ Pa .



a) Déterminer sans calcul le signe du travail échangé entre le système et l'extérieur au cours du cycle. Le cycle est-il moteur ou récepteur ? Définir alors son rendement.

b) En effectuant un bilan énergétique et un bilan entropique sur le cycle, exprimer le rendement du cycle en fonction de T_1 et T_2 . En déduire le travail reçu par le gaz parfait au cours du cycle en fonction de Q_1 (reçue par le gaz de la part de la source à T_1), de T_1 et de T_2 .

2) Ce cycle fonctionne maintenant en sens inverse dans une pompe à chaleur.

- Calculer les pressions du gaz P_2 et P_4 aux points A_2 et A_4 .
- Calculer les transferts thermiques $Q_{A_2-A_1}$ et $Q_{A_4-A_3}$ sur les transformations A_2A_1 et A_4A_3 .

c) Calculer le travail fourni par le milieu extérieur au gaz et définir, puis calculer l'efficacité thermique de la pompe à chaleur.

(Rép.: c) $W=Q_1(T_2/T_1 - 1) < 0$ moteur ; 2)a) $P_2 = 1,50.10^5 \text{ Pa}$; $P_4 = 1,33.10^5 \text{ Pa}$; b) $Q_{A2A1} = -765 \text{ J}$; $Q_{A4A3} = 676 \text{ J}$; c) $W = 89 \text{ J}$; $e_{th} = 8,6$.)

Exercice n°6 : Compression d'un mélange air-vapeur d'eau.

Soit un mélange de volume $V_0 = 2$ litres d'air ($P_a = 10^5 \text{ Pa}$) et de vapeur d'eau ($P_e = 8000 \text{ Pa}$). On comprime ce mélange de manière isotherme à 50°C jusqu'à $V = 1$ litre. On donne :

- la pression de vapeur saturante de l'eau à la température de l'expérience $T = 50^\circ\text{C}$: $1,2.10^4 \text{ Pa}$.
- l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau à 50°C sous $P = 1,2.10^4 \text{ Pa}$: $\Delta_{\text{vap}}H = 2300 \text{ J.g}^{-1}$
- l'air et la vapeur d'eau sont assimilables à des gaz parfaits.
- le volume massique de l'eau liquide est négligeable devant celui de l'eau vapeur.

- a) Quelle est la nature de la vapeur d'eau à l'état initial ? à l'état final ?
- b) Calculer la masse d'eau liquéfiée à l'état final.
- c) Calculer le volume V' à partir duquel la vapeur d'eau devient saturante.
- d) Calculer la variation d'entropie de l'air, de l'eau, de l'ensemble.

Rép.: a) EI : sèche ; EF : saturante ; b) $m = 0.027 \text{ g}$; c) $V' = 1,33 \text{ L}$; d) $\Delta S_{\text{air}} = -0,43 \text{ J.K}^{-1}$; $\Delta S_{\text{eau(vap seche)}} = -0.0201 \text{ J.K}^{-1}$; $\Delta S_{\text{eau (liquéfaction)}} = -0,191 \text{ J.K}^{-1}$.

Exercice n°7 : Calorimétrie

Expérience 1 :

Dans un calorimètre fermé par un piston calorifugé mobile, on introduit $m_1 = 200 \text{ g}$ d'eau liquide. Quand l'équilibre thermique est atteint, la température est relevée : $T_1 = 20^\circ\text{C}$. L'introduction d'une seconde masse d'eau $m_2 = 400 \text{ g}$ à la température $T_2 = 80^\circ\text{C}$, suivi de l'agitation du milieu, amène la température à la valeur de 59°C . On observe ensuite une lente diminution de la température.

Expérience 2 :

Le calorimètre contient à présent initialement 150 g d'eau à 30°C . On y introduit 20 g de glace à -4°C .

1. Déterminer numériquement la capacité thermique du calorimètre et de ses accessoires.
2. Pourquoi note-t-on une diminution de la température à la fin de la première expérience ?
3. Calculer la température finale du contenu du calorimètre après l'expérience 2.
4. Calculer la variation d'entropie totale au cours de cette expérience. Conclure.

Données :

- Enthalpie massique de fusion de la glace : $\Delta_{\text{fus}}h = 333 \text{ J.g}^{-1}$
- Capacités thermiques massiques : $C_{m,\text{eau liq}} = 4,18 \times 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$; $C_{m,\text{eau gla}} = 2,09 \times 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

(Rép. : 1) $C_{\text{calo}} = 64 \text{ J.K}^{-1}$; 3) $\theta_f = 17,9^\circ\text{C}$; 4) $\Delta S = 2,43 \text{ J.K}^{-1} = S_{cr} > 0$ irréversible.)