TD THERMODYNAMIQUE n° 4

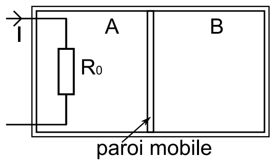
Premier principe de la thermodynamique

Capacités exigibles :

- Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir travail et transfert thermique ✠.
- Exploiter l'extensivité de l'énergie interne ☼.
- Calculer le transfert thermique sur un chemin donné connaissant le travail W et la variation de l'énergie interne Q ¤.
- Exprimer le premier principe sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et l'état final ◐.
- Exploiter l'extensivité de l'enthalpie et réaliser des bilans énergétiques en prenant en compte des transitions de phase ⋈.

Exercice 1 Récipient muni d'une paroi mobile*** ✠☼¤

Un récipient à parois rigides et calorifugées contient deux gaz parfaits diatomiques séparés par une paroi intérieure mobile sans frottement et calorifugée. Initialement, les gaz sont dans le même état caractérisé par les paramètres $P_1 = 1{,}00 \times 10^5$ Pa, $V_1 = 1,00\ L$ et $T_1 = 300\ K$. Un générateur fournit de l'énergie au gaz A par l'intermédiaire d'une résistance $R_0 = 10\ \Omega$, de capacité thermique négligeable, parcourue par un courant continu $I = 1,0\ A$, pendant une durée τ au bout de laquelle le volume du gaz A atteint la valeur $V_A = 1,10\ L$. L'évolution est supposé quasistatique. *Données :* $R = 8,31\ J.K^{-1}.mol^{-1}$ et $\gamma = 1,40$.



1. Calculer la pression finale P_2 dans les deux compartiments.
2. Calculer la température finale T_B du gaz dans le compartiment B.
3. Calculer la température finale T_A du gaz dans le compartiment A.
4. Calculer le transfert thermique Q_A reçu par le gaz en A. En déduire τ.
5. Calculer le travail W_B reçu par le gaz en B.

Exercice 2 Détente d'hélium ✠☼¤

Une enceinte cylindrique fermée par un piston, mobile sans frottement, contient 500 g d'hélium gazeux, monoatomique, de masse molaire $M = 4\ g.mol^{-1}$. Dans l'état (1) initial, le volume de l'enceinte est $V_1 = 100\ L$ et le gaz, supposé parfait, est à la température $T_1 = 600\ K$. On rappelle que l'énergie interne de n moles de gaz parfait monoatomique à la température T s'écrit $U = \frac{3}{2}nRT$, où R désigne la constante des gaz parfait. *Donnée :* $R = 8,31\ J.K^{-1}.mol^{-1}$.

1. Calculer la capacité thermique massique à volume constant c_V de l'hélium.
2. Par déplacement du piston, le gaz subit une détente isotherme, supposée réversible, qui le conduit de l'état (2) caractérisé par un volume $V_2 = 250\ L$. Calculer la pression P_2 du gaz dans l'état (2).
3. Quel est le travail $W_{1\to2}$ reçu par le gaz au cours de cette évolution isotherme ?
4. On envisage une nouvelle évolution réversible, constituée d'une détente adiabatique entre l'état (1) et un état intermédiaire (3) de volume $V_3 = V_2$, suivie d'un chauffage isochore entre l'état (3) et l'état final (2), défini précédemment. Déterminer la température T_3, de l'état intermédiaire.
5. Calculer le travail $W_{(1)\to(3)\to(2)}$.

Exercice 3 Échauffement d'un liquide ✠☼¤◐

Soit la transformation de $m = 1\ kg$ d'eau liquide de l'état initial ($T_0 = 373\ K$, $P_0 = 1,00\ bar$) à l'état final ($T_f = 485\ K$, $P_f = 20,0\ bar$). Les tables nous donnent pour le volume massique de l'eau ($v_0(T_0) = 1,04.10^{-3} m^3.kg^{-1}$ et $v_f(T_f) = 1,18.10^{-3}\ m^3.kg^{-1}$ et pour la capacité thermique massique de l'eau liquide supposée constante entre T_0 et T_f : $c = 4,18.10^3 J.K^{-1}.kg^{-1}$.

1. Calculer la variation du produit PV entre l'état initial et l'état final.
2. Calculer la variation d'énergie interne ΔU. Quelle erreur relative commet-on en confondant ΔU et ΔH ?

Exercice 4 Oscillations d'un piston dans un cylindre ✠☼¤

Un piston de masse M_0 peut coulisser sans frottement dans un cylindre de section S placé dans l'air à la pression P_0. Les parois du récipient et le piston sont athermanes (non conducteur de chaleur). Le cylindre contient de l'air assimilable à un gaz parfait, à la température T_0 ; à l'équilibre, le piston se trouve à une distance h du fond du récipient. On supposera que la transformation est adiabatique et quasi-statique.

1. Calculer à l'équilibre la pression P_1 de l'air à l'intérieur du réservoir.
2. On pose sur le piston une masse $m \ll M_0$. Déterminer le mouvement du piston. Le piston s'arrêtera-t-il. On introduira le rapport γ des capacités thermiques à pression constante et à volume constant de l'air.

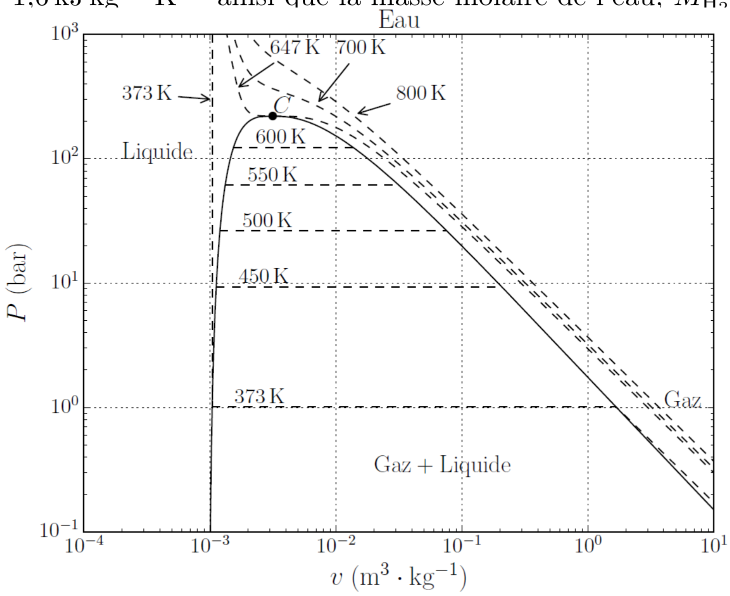
Exercice 5 Calorimétrie

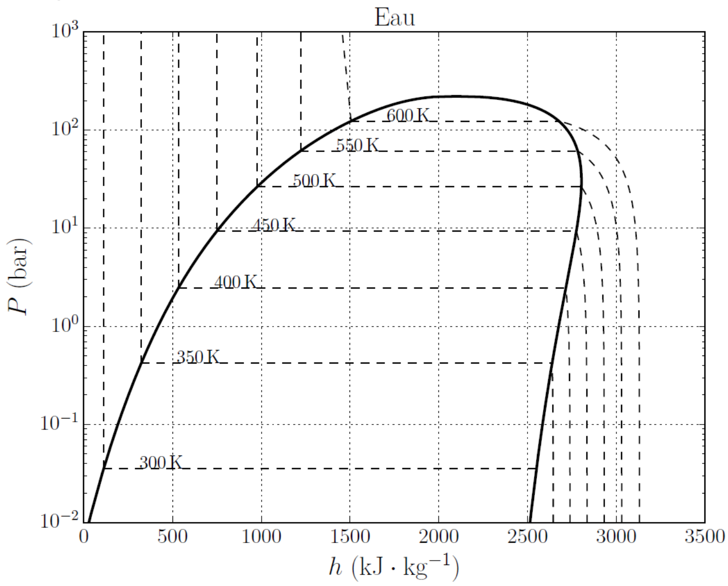
On dispose d'un calorimètre, parfaitement isolé, rempli d'un mélange eau-glace en équilibre thermique (à $T_f = 0°C$). Le calorimètre comporte un thermomètre, un agitateur et une résistance chauffante immergés dans le mélange eau-glace. La capacité calorifique totale du calorimètre avec ses accessoires est $\mu.J$; ici μ est sa valeur en eau et J la capacité thermique massique de l'eau. A l'instant initial t_0, la masse de glace est m_g et la masse totale (eau + glace) est M. La résistance chauffante est alors alimentée avec une puissance constante P. Le thermomètre indique une température constante jusqu'à l'instant t_1 qui correspond à la fin de la fusion de la glace. Ensuite la température augmentant jusqu'à la température d'ébullition de l'eau ($T_{eb} = 100°C$) qui se produit à l'instant t_2.

1. Soit L_F l'enthalpie massique (chaleur latente massique) de fusion de la glace. On admettra que pour l'eau, les capacités thermiques massiques, entre 0 et $100°C$, restent constantes : $C_p = C_V = J$. En déduire L_F en fonction de J, M, μ , m_g et des instants t_0, t_1, t_2, T_f et T_{eb}.
2. Une fois la température d'ébullition atteinte (à l'instant t_2), la puissance de chauffage restant constante (toujours égale à P), l'ensemble du dispositif ayant été placé sur une balance, on suit l'évolution de la masse du calorimètre avec son contenu et ses accessoires jusqu'à ce que la masse totale soit réduite de $\frac{M}{2}$; on appelle t_3 l'instant correspondant à cette perte de masse. Soit L_V l'enthalpie massique (chaleur latente massique) de vaporisation de l'eau, exprimer L_V en fonction de J, M, μ, t_1, t_2, t_3, T_f et T_{eb}.
3. Application numérique : $\frac{M}{m_g} = 10$; $m_g = 100\ g$; $\mu = 200\ g$; $t_1 - t_0 = 2,0$ minutes ; $t_2 - t_1 = 30\ minutes$; $t_3 - t_2 = 67.5\ minutes$. On donne $J = 4180\ J.kg^{-1}.K^{-1}$. Donner les valeurs de L_F et L_V, et la valeur de P.

Exercice 6 Compressions variées

1,0 kg de vapeur d'eau (supposée être un gaz parfait) est initialement à la température $T_I = 373\,\mathrm{K}$ et occupe le volume $V_I = 2{,}0\,\mathrm{m}^3$ (état I). On comprime très lentement cette vapeur de façon isotherme pour l'amener dans l'état K caractérisé par une pression $P_K = 1{,}0\,\mathrm{bar}$ et un volume occupé $V_K = 1{,}0 \times 10^{-1}\,\mathrm{m}^3$. On donne la constante des gaz parfaits, $R = 8{,}31\,\mathrm{J\,K^{-1}\,mol^{-1}}$, la capacité thermique massique à volume constante de l'eau vapeur, $c_V = 1{,}6\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}\,K^{-1}}$ ainsi que la masse molaire de l'eau, $M_{H_2O} = 18\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$.





1. Placer les points représentatifs des états I et K sur le diagramme (P, v) et tracer le trajet suivi par l'eau entre I et K. Caractériser entièrement l'état K.
2. Placer les points I et K sur le diagramme (P, h).
3. Calculer le travail reçu par l'eau au cours de la transformation IK.
4. Déterminer la variation d'énergie interne entre I et K (on pourra utiliser les données du diagramme (P, h)). En déduire le transfert thermique reçu par l'eau entre I et K.
5. On réalise alors une compression isochore amenant le système à 450 K (état F). Placer le point représentatif de F sur le diagramme (P, v) et le caractériser entièrement. Le placer ensuite sur le diagramme (P, h) et en déduire la variation d'enthalpie entre K et F.
6. Calculer le travail des forces de pression reçu par l'eau au cours de la transformation KF.
7. Déterminer la variation d'énergie interne entre K et F. En déduire le transfert thermique reçu par l'eau entre K et F.

Solutions des exercices

[1] *Réponses : 1)* $P_2 = 1,16.10^5\ Pa$ *; 2)* $T_B = 313\ K$ *; 3)* $T_A = 383\ K$ *; 4)* $Q_A = 80\ J$, $\tau = 8\ s$; $W_B = 11\ J$

[2]*Réponses : 1)* $c_V = 3,12.10^3\ J.kg^{-1}.K^{-1}$; $P_2 = 2,49.10^6\ Pa$; *3)* $W_{1\rightarrow 2} = -571\ kJ$; *4)* $T_3 = 326\ K$; *5)* $W_{(1)\rightarrow(3)\rightarrow(2)} = -427\ kJ$

[3]*Réponses : 1)* $\Delta(PV) = 2,26\ kJ$; *2)* $Q = 468\ kJ$, $< 0,5\%$

[4]*Réponses : 1)* $P_1 = P_0 + \frac{M_0 g}{S}$; *2)* $x = -\frac{hmg}{\gamma P_1 S}(1 - \cos\omega t)$, $\omega = \sqrt{\frac{\gamma P_1 S}{h(M_0+m)}}$

[6]*Réponses : 1)* $L_F = \frac{(\mu+M)J(T_{eb}-T_f)(t_1-t_0)}{m_g(t_2-t_1)}$; *2)* $L_V = \frac{2(\mu+M)J(T_{eb}-T_f)(t_3-t_2)}{M(t_2-t_1)}$; *3)* $L_F = 334\ kJ.kg^{-1}$; $L_V = 2257\ kJ.kg^{-1}$; $P = 279\ W$