

TD n° 21 de Physique

Thermodynamique - Deuxième principe

On rappelle que l'on peut utiliser, si besoin, les expressions de l'entropie

$$\text{pour les gaz parfaits : } S(T, P) = C_p \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) - n R \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) + S(T_0, P_0)$$

$$\text{pour les phases condensées : } S(T, P) = C \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + S(T_0, P_0)$$

Applications directes du cours

1 Formule de Reech

On définit des coefficients, respectivement de compressibilité adiabatique et de compressibilité isotherme, par

$$\chi_Q = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_Q \quad \text{et} \quad \chi_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$

Le coefficient de compressibilité adiabatique est la valeur du coefficient de compressibilité à prendre en compte sur une transformation adiabatique et réversible.

Exprimer, pour un gaz parfait, le lien entre ces deux coefficients et le rapport des capacités thermiques γ .

2 Refroidissement d'un caillou

On jette dans un lac un caillou de masse $m = 200$ g, initialement à 20°C . Le lac est suffisamment grand pour que sa température $T_e = 277$ K soit supposée constante. Le caillou a une capacité thermique massique $c = 10^3$ J·K⁻¹·kg⁻¹. Déterminer l'entropie créée par cette évolution.

La transformation est-elle réversible ? Quelle est la cause de l'irréversibilité ?

3 Échauffement d'un gaz au contact d'un thermostat

Un récipient fermé, dont les parois rigides sont diathermes, contient un gaz parfait diatomique à l'état A ($P_A = 1$ bar, $V_A = 1$ L, $T_A = 293$ K). On place ce récipient dans une étuve portée à la température $T_B = 333$ K jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit atteint.

Calculer la variation d'entropie du gaz, la variation d'entropie de l'étuve, la création d'entropie.

La transformation est-elle réversible ? Quelle est la cause de l'irréversibilité ?

4 Contact de deux solides de même capacité thermique

On met en contact deux solides de même capacité thermique C , de températures initiales respectives T_1 et T_2 . Exprimer la température finale T_f et l'entropie créée S_c . Vérifier qu'elle est positive.

Exercices

1 Transformations couplées

Un piston sépare le volume d'un cylindre en deux compartiments A et B. Le cylindre et le piston sont parfaitement calorifugés. Chaque compartiment contient la même quantité n d'un gaz parfait monoatomique. Le volume total vaut $V = V_A + V_B = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. À l'état initial, $V_B = 4 V_A$, $T_A = T_B = T_0 = 289 \text{ K}$ et $P_A = P_0 = 24 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. On débloquent alors le piston (travail supposé négligeable) et ce dernier se déplace sans frottement jusqu'à l'équilibre mécanique.

1. Calculer la quantité de gaz n contenue dans A et B et la pression initiale P_B .
2. Établir la relation entre les variations d'énergie ΔU_A et ΔU_B du gaz dans A et B.
3. À l'état final, l'écart de température $T'_B - T'_A$ est de 130 K. Déterminer T'_A et T'_B .
4. Calculer la pression P'_A et le volume V'_A du gaz dans A.
5. Calculer les variations d'entropie ΔS_A et ΔS_B du gaz dans A et B au cours du déplacement du piston.
6. La transformation est-elle réversible ou irréversible ?

2 Transformations isentropique et isobare du diazote

Une masse $m = 560 \text{ g}$ de diazote, assimilé à un gaz parfait, est initialement à la température $T_0 = 300 \text{ K}$ et à la pression $p_0 = 4 \text{ bar}$. Elle subit successivement deux transformations : une transformation adiabatique réversible, de l'état initial $A_0(T_0, p_0)$ à un état intermédiaire $A'(T', p_1)$, avec $p_1 = p_0(1 + \varepsilon)$ et ε positif, puis une transformation isobare au contact avec un thermostat de température T_0 , de l'état $A'(T', p_1)$ à l'état final $A_1(T_0, p_1)$.

1. Exprimer V' et V_1 en A' et A_1 , en fonction de V_0 , ε et γ .
2. En déduire T' , en fonction de T_0 , ε et γ .
3. Tracer l'évolution du gaz dans le diagramme de Clapeyron.
4. Effectuer le bilan énergétique pour chacune des deux transformations puis pour la transformation globale, c'est-à-dire calculer la variation d'énergie interne, le travail reçu et le transfert thermique reçu par le gaz, en fonction de p_0 , V_0 , ε et γ .
5. Effectuer le bilan entropique pour chacune des deux transformations puis pour la transformation globale, c'est-à-dire calculer la variation d'entropie, l'entropie échangée par le gaz et l'entropie créée par la transformation, en fonction de p_0 , T_0 , V_0 , ε et γ .
6. Application numérique : $\varepsilon = 3$.
7. Que deviennent les bilans énergétiques et entropiques pour $\varepsilon \ll 1$? Commenter ce résultat.

3 Contact thermique à température variable

Soit deux quantités de masse m d'un même solide de chaleur massique c supposée constante. À l'état initial, l'une des masses est à la température $T_{1,0}$ et l'autre à la température $T_{2,0} < T_{1,0}$. Ces deux masses sont mises en contact, l'ensemble est supposé thermiquement isolé.

1. Expliquer pourquoi l'ensemble atteint une température finale d'équilibre. Déterminer T_f .
2. Exprimer la variation d'entropie du système $\Delta S_{\text{système}}$ ainsi que l'entropie créée lors de cette transformation, en fonction de m , c , $T_{1,0}$ et $T_{2,0}$.
3. On suppose que $T_{1,0}$ et $T_{2,0}$ sont très proches l'une de l'autre, soit $T_{2,0} = T_{1,0}(1 + \varepsilon)$ avec $\varepsilon \ll 1$. Exprimer $\Delta S_{\text{système}}$ en fonction de m , c et ε .
4. En comparant $\Delta S_{\text{système}}$ et ΔT , montrer que la transformation tend dans ce cas vers une évolution réversible. Donner une interprétation physique de ce résultat.

4 Surfusion du phosphore

Soit un récipient calorifugé contenant une masse $m = 10\text{ g}$ de phosphore liquide *surfondu* à la température $\theta = 34^\circ\text{C}$ sous la pression atmosphérique. À cette température et cette pression, le phosphore est censé être solide : la surfusion est un état d'équilibre instable : dès que l'on introduit un cristal de solide ou une impureté, ou dès que l'on agite le récipient, la surfusion cesse et le liquide se solidifie au moins en partie.

On donne, pour le phosphore sous pression atmosphérique,

$$T_F = 317\text{ K} \quad \ell_F(T_F) = 20,9 \cdot 10^3\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1} \quad c_{P(\text{liq})} = 0,795\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad c_{P(\text{sol})} = 0,840\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

1. On fait brusquement cesser la surfusion, un nouvel état d'équilibre diphasé apparaît. Déterminer la masse respective des deux phases.
2. Calculer la variation d'entropie correspondant à la transformation. Commenter.
3. Quel serait l'état final du système si on faisait cesser la surfusion initialement à $\theta' = 17,5^\circ\text{C}$?
4. Calculer la variation d'entropie correspondant à cette nouvelle transformation. Commenter.

5 Vaporisation de l'eau

On vaporise une masse $m = 1\text{ g}$ d'eau liquide, initialement à 100°C et à la pression atmosphérique P_{atm} , au sein d'une enceinte entourée d'un thermostat à 100°C . Deux processus différents sont définis :

- L'enceinte est un cylindre fermé par un piston. Par déplacement lent du piston, on augmente le volume à température constante et on s'arrête dès que toute l'eau est vaporisée. Le volume est alors égal à $V = 1,67\text{ L}$.
- On introduit rapidement la masse d'eau liquide dans l'enceinte de volume $1,67\text{ L}$, initialement vide. L'enthalpie massique de vaporisation de l'eau est $\ell_v = 2,25 \cdot 10^6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1. Pour chacun des processus précédents, calculer les variations d'enthalpie, d'entropie et d'énergie interne de l'eau, ainsi que le transfert thermique fourni par le thermostat.
2. Calculer l'entropie créée lors des deux processus. Commenter.