TD n° 20 de Physique
Thermodynamique - Premier principe

Applications directes du cours

1 Canette autoréfrigérante

À l'occasion de la coupe du monde de football 2002, une canette autoréfrigérante a été mise au point. Elle comprend un réservoir en acier contenant un liquide réfrigérant. Lorsque l'on ouvre la canette, ce liquide se détend brusquement et se vaporise à l'air libre après avoir traversé une spirale en aluminium qui serpente dans la boisson à refroidir. Le volume de la boisson à refroidir est $V = 33\,\text{cm}^3$, et l'on considérera pour simplifier qu'il s'agit d'eau, de capacité thermique massique $c = 4{,}2\,\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$. On considère que le corps réfrigérant est constitué d'une masse $m_\text{r} = 60\,\text{g}$ de N_2 dont l'enthalpie massique de vaporisation est $\ell_\text{v} = 200\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Après avoir correctement défini le système dont on qualifiera la transformation d'isobare et adiabatique (à justifier), calculer la variation de température de la boisson.

2 Évolution isobare d'un gaz parfait

Une quantité $n = 0{,}05\,\text{mol}$ de gaz parfait monoatomique subit une transformation isobare réversible à la pression $P = 10^5\,\text{Pa}$ entre les volumes $V_1 = 1\,\text{L}$ et $V_2 = 1{,}5\,\text{L}$. Le seul travail échangé est celui des forces de pression.

Représenter la transformation dans un diagramme de Clapeyron. Expliquer pourquoi le volume du gaz peut augmenter alors que la pression est inchangée. Quel est l'échange thermique reçu par le système ? Commenter le sens dans lequel il a lieu.

3 Transpiration

Quel volume d'eau devez-vous éliminer par transpiration pour débarrasser votre corps des 75 W de puissance thermique correspondant à votre métabolisme lorsque vous êtes au repos ? On prendra la température de la peau égale à 33 °C et l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau à cette température égale à $2420\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Commenter, sachant qu'un être humain évacue en moyenne par transpiration environ 0,5 L d'eau par jour.

Le fait de s'essuyer avec une serviette aide-t-il au refroidissement du corps ?

Exercices

1 Calorimétrie

Un calorimètre en équilibre thermodynamique contient une masse d'eau $m_1 = 300\,\text{g}$ à la température $\theta_1 = 15\,°\text{C}$. On ajoute une masse $m_2 = 250\,\text{g}$ d'eau à la température $\theta_2 = 60\,°\text{C}$. La température finale du mélange, lorsque l'équilibre thermique est atteint, est $\theta_\text{f} = 34\,°\text{C}$. La capacité thermique massique de l'eau vaut $4{,}18\,\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1. Calculer la capacité thermique du calorimètre.
2. Dans le même calorimètre contenant une masse d'eau m_1 à la température θ_1, on ajoute cette fois un bloc de cuivre de masse $m_3 = 295\,\text{g}$ préalablement porté à la température $\theta_3 = 80\,°\text{C}$. La température finale est $\theta' = 19{,}7\,°\text{C}$. Calculer la capacité thermique massique du cuivre.

2 Étude d'un cycle moteur

On considère le cycle réversible suivant, décrit par deux moles de gaz parfait diatomique :
– une compression isotherme d'un état A à un état B, avec $P_\mathrm{A} = 1\,\mathrm{bar}$, $T_\mathrm{A} = T_\mathrm{B} = 298\,\mathrm{K}$;
– un échauffement isobare de l'état B à un état C, avec $T_\mathrm{C} = 400\,\mathrm{K}$
– une détente adiabatique de l'état C à l'état A, sur laquelle on suppose la relation $P\,V^\gamma = \mathrm{cte}$.

1. Représenter le cycle dans le diagramme de Clapeyron.
2. Déterminer les coordonnées des points A, B et C dans ce diagramme.
3. Exprimer puis calculer les travaux et transferts thermiques reçus par le gaz à chaque transformation.

3 Loi de Laplace

Un gaz parfait est enfermé dans une enceinte calorifugée surmontée d'un piston athermane. À l'état initial, les n moles de ce gaz se trouvent à la température T_0 sous la pression P_0.

Un opérateur agit très lentement sur le piston et amène le gaz dans un état final (T_1, P_1). On suppose que le piston coulisse sans frottement dans l'enceinte. On note T, P et V la température, la pression et le volume du gaz à un instant quelconque de la transformation. On suppose les capacités thermiques molaires indépendantes de la température. On note $\gamma = \dfrac{C_\mathrm{Pm}}{C_\mathrm{Vm}}$.

1. Cette transformation peut-elle être supposée réversible ?
2. À l'aide d'un bilan énergétique, montrer que $\dfrac{\mathrm{d}T}{T} = (1-\gamma)\,\dfrac{\mathrm{d}V}{V}$.
3. En déduire la relation liant T_0, V_0, T_1, V_1 et γ, puis celles entre P_0, V_0, P_1, V_1 et γ, et entre T_0, P_0, T_1, P_1 et γ.
4. Exprimer par un calcul direct le travail échangé entre le gaz et le milieu extérieur.
5. Retrouver ce résultat grâce à un bilan énergétique.

4 Compression monotherme d'un gaz parfait

Un cylindre de section S, aux parois diathermes, est placé dans l'air ambiant à la température T_0 et à la pression P_0. Il contient de l'air, supposé gaz parfait, surmonté d'un piston diatherme de masse m_0. On note h_1 la hauteur du piston par rapport au fond du cylindre.

1. Déterminer la pression P_1 du gaz.

On pose une masse m_0 sur le piston, qui comprime alors, de façon *immédiate*, le gaz.

2. Déterminer la nouvelle pression P_2 du gaz.
3. Déterminer la hauteur h_2 du piston en fonction de h_1, P_0, m_0 et S.
4. Déterminer le travail W et le transfert thermique Q reçus par le gaz lors de cette transformation. On prendre soin de simplifier au maximum ces expressions.

On reprend le même état initial. Cette fois, on verse de façon *lente* une masse m_0 de sable sur le piston.

5. Reprendre les questions précédente, en notant P_2', h_2', W' et Q' les grandeurs cherchées.

5 Apport d'énergie électrique

Un récipient de volume $2\,V = 4\,\mathrm{L}$ est partagé en deux compartiments (1) et (2) séparés par une paroi mobile et athermane. Le premier compartiment est calorifugé, le deuxième est entouré de parois diathermes. Chacun contient n moles d'un gaz parfait diatomique, qui occupe un volume initial V, sous la pression $P_0 = 1\,\mathrm{bar}$ et la température $T_0 = 300\,\mathrm{K}$ (égale à la température extérieure).

Dans le compartiment (1) se trouve une résistance électrique R, dans laquelle on fait passer un courant I. Le phénomène, assez lent, conduit au bout d'un temps τ à obtenir une pression dans le compartiment (1) $P_1 = 2\,P_0$.

1. Déterminer et calculer les grandeurs P_2, V_2 et T_2 au bout du temps τ dans le compartiment (2).
2. En déduire les expressions et les valeurs de V_1 et T_1.
3. Déterminer et calculer les variations d'énergie interne ΔU_1 et ΔU_2.
4. Quel travail W_2 a été reçu par le compartiment (2) ? Combien vaut W_1 reçu par le compartiment (1) ?
5. Si $R = 1\,\Omega$ et $I = 5\,\mathrm{A}$, déterminer la valeur de τ.

6 Fuite thermique par une vitre

On considère une pièce d'habitation de capacité thermique totale $C = 100\,\mathrm{kJ{\cdot}K^{-1}}$, de température $T(t)$ à l'instant t, supposée uniforme en tout point de la pièce. Les fuites thermiques se font uniquement par l'intermédiaire d'une fenêtre simple vitrée de surface S. La température de l'extérieur est constante, de valeur $T_0 = 273\,\mathrm{K}$. La pièce est chauffée par un radiateur électrique de résistance R, alimenté par le secteur à une tension efficace $U = 220\,\mathrm{V}$.
À $t = 0$, la pièce est à la température $T(0) = 283\,\mathrm{K}$ et on met en route le chauffage.

La puissance $\mathcal{P}_\mathrm{f}$ de fuite thermique est décrite par la loi de Newton : $|\mathcal{P}_\mathrm{f}| = k\,S\,|T - T_0|$, avec k un coefficient positif appelé coefficient de transfert thermique surfacique.

1. Déterminer la puissance thermique totale $\mathcal{P}_\mathrm{th}$ algébriquement reçue par la pièce.
2. Quelle valeur doit avoir R pour qu'en régime permanent la température de la pièce soit $T_1 = 293\,\mathrm{K}$? Application numérique : $S = 1\,\mathrm{m^2}$, $k = 5{,}6$ USI.
3. À l'aide d'un bilan énergétique, déterminer l'équation différentielle régissant l'évolution de la température de la pièce.
4. En déduire le temps de chauffage caractéristique de la pièce. Commenter cette valeur.
5. Déterminer et tracer $T(t)$.
6. Comment peut-on rendre la pièce plus agréable à vivre ?

7 Fusion de glaçons dans un verre d'eau

On introduit deux glaçons de 10 g chacun, initialement à $-19\,°\mathrm{C}$, dans un verre d'eau de 250 mL initialement à $25\,°\mathrm{C}$. On néglige les échanges thermiques avec l'atmosphère. On donne :
– l'enthalpie massique de fusion de l'eau à $0\,°\mathrm{C}$: $\Delta h_\mathrm{fus} = 333\,\mathrm{J{\cdot}g^{-1}}$
– la capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_\ell = 4{,}18\,\mathrm{J{\cdot}g^{-1}{\cdot}K^{-1}}$
– la capacité thermique massique de la glace : $c_\mathrm{g} = 2{,}10\,\mathrm{J{\cdot}g^{-1}{\cdot}K^{-1}}$
– la masse volumique de l'eau liquide $\rho = 1\,\mathrm{g{\cdot}cm^{-3}}$
Déterminer l'état final (état physique, composition et température).

8 Formation de la neige artificielle

La neige artificielle est obtenue en pulvérisant, à l'aide de canons à neige, de fines gouttes d'eau liquide à $T_0 = 10\,°\mathrm{C}$ dans l'air ambiant à $T_\mathrm{a} = -15\,°\mathrm{C}$. On se propose de déterminer le temps mis par une goutte d'eau pour passer de l'état liquide à l'état solide.

Dans un premier temps, la goutte d'eau, supposée sphérique de rayon $R = 0{,}2\,\mathrm{mm}$, se refroidit en restant liquide. Elle reçoit de l'air extérieur un transfert thermique $h\,(T_\mathrm{a} - T(t))$ par unité de temps et de surface, où $T(t)$ est la température de la goutte à l'instant t. On rappelle que la masse volumique de l'eau est $\rho = 1{,}0 \cdot 10^3\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$ et sa capacité thermique massique est $c = 4{,}18\,\mathrm{kJ{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1}}$.

1. Établir l'équation différentielle vérifiée par $T(t)$. On pourra supposer la goutte indéformable est à l'équilibre mécanique avec le milieu ambiant.
2. En déduire le temps t_1 tel que $T(t_1) = T_1 = -5\,°\mathrm{C}$. On suppose que la goutte est toujours liquide : elle est dans un état de *surfusion*, état liquide pour $T < T_\mathrm{fus}$. Effectuer l'application numérique pour $h = 65\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}}$.

Lorsque la goutte atteint la température de $-5\,°\mathrm{C}$, il y a rupture de la surfusion : la goutte est partiellement solidifiée et la température devient égale à $0\,°\mathrm{C}$.

4. Calculer la fraction x de liquide restant à solidifier en supposant la transformation très rapide, donc adiabatique. On néglige également la variation de volume due au changement de masse volumique. L'enthalpie massique de fusion de la glace (ou chaleur latente de changement de phase solide-liquide) vaut $\ell_\mathrm{f} = 333\,\mathrm{kJ{\cdot}kg^{-1}}$.
5. La solidification continue. Montrer qu'à chaque durée infinitésimale $\mathrm{d}t$, une masse $\mathrm{d}m$ proportionnelle se solidifie. Au bout de combien de temps la goutte est-elle totalement solidifiée ?