

Chapitre P14

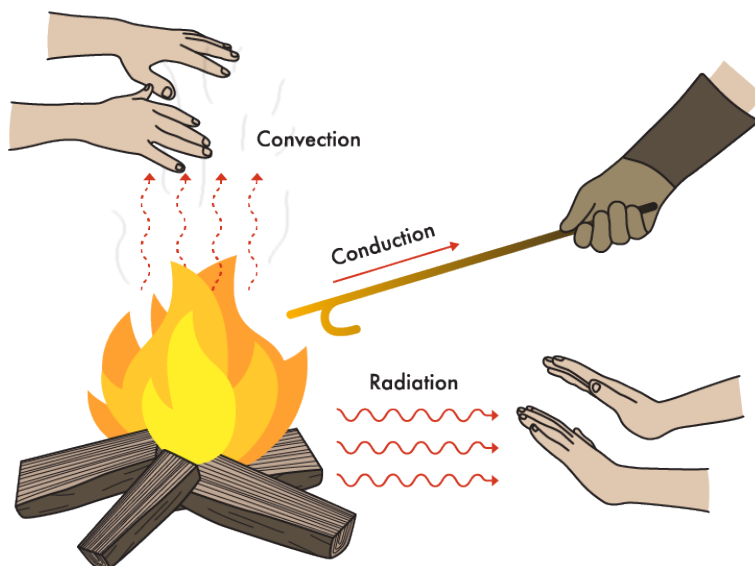
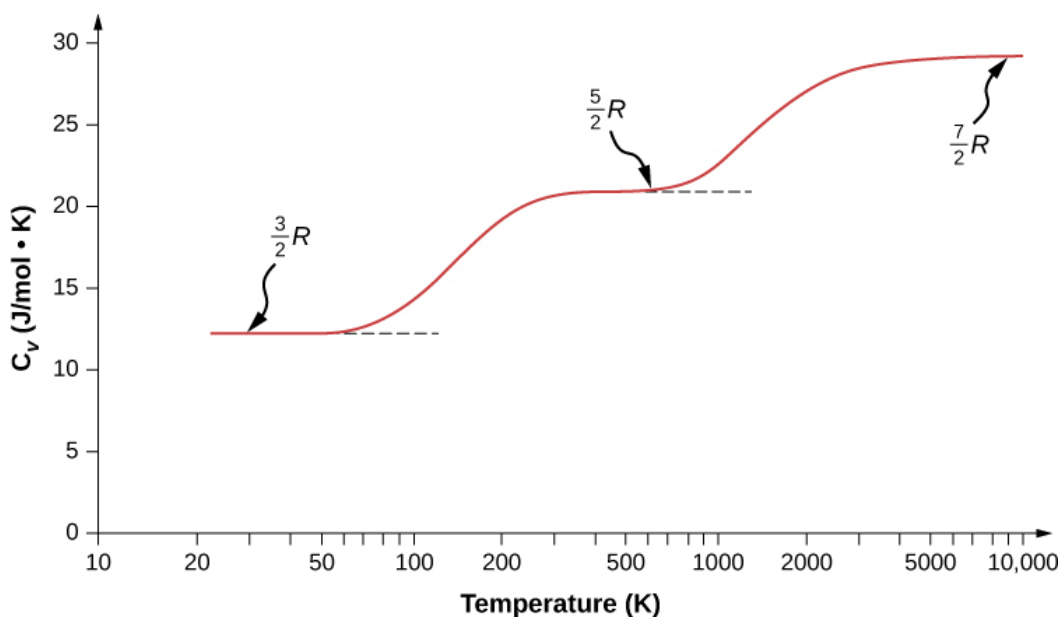
Bilans d'énergie

Notions et contenus	Capacités exigibles
Transformation thermodynamique subie par un système. Évolutions isochore, isotherme, isobare, monobare, monotherme.	Définir un système adapté à une problématique donnée. Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur pour déterminer l'état d'équilibre final.
Travail des forces de pression. Transformations isochore, monobare.	Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable. Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron.
Transferts thermiques. Transformation adiabatique. Thermostat, transformations monotherme et isotherme.	Distinguer qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement. Identifier dans une situation expérimentale le ou les systèmes modélisables par un thermostat.
Énergie interne d'un système. Capacité thermique à volume constant dans le cas du gaz parfait.	Exprimer l'énergie interne d'un gaz parfait monoatomique à partir de l'interprétation microscopique de la température. Exploiter la propriété $U_m = U_m(T)$ pour un gaz parfait.
Énergie interne et capacité thermique à volume constant d'une phase condensée considérée incompressible et indilatable.	Exploiter la propriété $U_m = U_m(T)$ pour une phase condensée incompressible et indilatable.
Premier principe de la thermodynamique.	Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir travail et transfert thermique. Utiliser le premier principe de la thermodynamique entre deux états voisins. Exploiter l'extensivité de l'énergie interne. Distinguer le statut de la variation de l'énergie interne du statut des termes d'échange. Calculer le transfert thermique sur un chemin donné connaissant le travail et la variation de l'énergie interne.
Enthalpie d'un système. Capacité thermique à pression constante dans le cas du gaz parfait et d'une phase condensée incompressible et indilatable.	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 dans l'état final. Exprimer l'enthalpie $H_m(T)$ du gaz parfait à partir de l'énergie interne. Justifier que l'enthalpie H_m d'une phase condensée peu compressible et peu dilatable peut être considérée comme une fonction de l'unique variable T . Citer l'ordre de grandeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.
Enthalpie associée à une transition de phase : enthalpie de fusion, enthalpie de vaporisation, enthalpie de sublimation.	Exploiter l'extensivité de l'enthalpie et réaliser des bilans énergétiques en prenant en compte des transitions de phases. <i>Capacité expérimentale : mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une grandeur thermodynamique énergétique (capacité thermique, enthalpie de fusion, etc.).</i>

Questions de cours

- Exprimer le travail des forces de pression ; donner son interprétation graphique dans le diagramme de Watt (P_{ext}, V).
- Définir les trois types de transfert thermique.
- Définir l'énergie interne. Indiquer les propriétés que possède l'énergie interne d'un gaz parfait et d'une phase condensée incompressible et indilatable.
- Exprimer l'énergie interne d'un gaz parfait monoatomique à partir de l'interprétation microscopique de la température.
- Énoncer le premier principe de la thermodynamique. Cas d'un système au repos macroscopique.
- Exprimer et démontrer le premier principe sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et dans l'état final.
- Définir l'enthalpie. Donner son expression pour un gaz parfait monoatomique.
- Définir les capacités thermiques à volume constant et à pression constante.
- Démontrer la loi de Mayer. En déduire les capacités thermiques d'un gaz parfait en fonction de l'indice adiabatique γ .
- Citer l'ordre de grandeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.
- Définir l'enthalpie massique de changement d'état. Comment sont leurs valeurs pour deux transitions de phases inverses ?

Document 1. Modes de transfert thermique

Document 2. Capacité thermique molaire à volume constant d'un gaz diatomique (H_2)

Exercice de cours A. Cycle

On fait parcourir une quantité n d'un gaz, considéré comme parfait, le cycle suivant de manière quasi-statique :

- isotherme de l'état $A(P_A, V_A, T_A)$ à l'état $B(P_B = 3P_A, V_B, T_B)$;
- isobare de l'état B à un état C ;
- isochore de l'état C à l'état A .

1. Donner l'expression de T_B et V_B .
2. Caractériser l'état C et tracer le cycle sur le diagramme de Clapeyron.
3. Déterminer les travaux reçus par le gaz au cours des transformations successives.
4. Calculer le travail reçu sur le cycle. Commenter son signe.

Exercice de cours B. Bouilloire

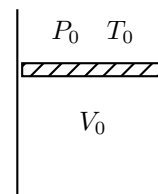
Pour préparer une tisane, on chauffe un volume $V = 0,50$ L d'eau de 20°C à 100°C .

1. Déterminer la capacité thermique à volume constant de cette eau.
2. En déduire la variation d'énergie interne lors du chauffage.
3. Cette énergie est apportée par une bouilloire de puissance $\mathcal{P} = 2,2$ kW. Quelle est la durée du transfert d'énergie ?

Exercice de cours C. Compression

Un cylindre vertical de section S aux parois diathermes est fermé par un piston de masse négligeable libre de se déplacer verticalement. Il contient initialement un gaz parfait de volume V_0 , en équilibre avec l'atmosphère de volume P_0 et de température T_0 .

On pose brutalement une masse m sur le piston, le système évolue jusqu'à atteindre un nouvel état d'équilibre.



1. Caractériser la transformation subie par le gaz.
2. Déterminer l'état d'équilibre obtenu.
3. Exprimer le travail reçu par le gaz.
4. Quelle est la variation de l'énergie interne ? En déduire le transfert thermique reçu par le gaz.
5. Qu'est-ce qui change si la même masse est posée grain par grain sur le piston ?

Exercice de cours D. Temps de réponse d'un thermomètre à mercure

On souhaite mesurer la température T_{liq} d'un liquide avec un thermomètre à mercure. La partie utile du thermomètre est un cylindre de rayon $a = 3$ mm et de hauteur $H = 1,5$ cm.

Le transfert thermique entre le thermomètre et le liquide est modélisé de la manière suivante : la puissance thermique reçue par le thermomètre est $\Phi = hS(T_{\text{liq}} - T)$ où T est la température du thermomètre, $h = 28,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ et S la surface utile du thermomètre.

On immerge le thermomètre à l'instant $t = 0$, sa température initiale étant T_0 .

Données : masse volumique du mercure $\mu = 13,6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; capacité thermique massique du mercure $c = 140 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

1. Obtenir une équation différentielle pour $T(t)$.
2. En déduire le temps de réponse du thermomètre.

Exercice de cours E. Chauffage monobare d'un gaz

Une mole d'un gaz d'indice adiabatique $\gamma = 1,4$ supposé parfait est placée dans une enceinte fermée par un piston sans masse, libre de se déplacer au contact de l'atmosphère de pression $p = 1,0$ bar. L'enceinte et le piston sont calorifugés.

À l'aide d'une résistance chauffante placée dans l'enceinte, on chauffe le gaz de 20°C à 80°C .

1. Calculer la capacité thermique à pression constante du gaz.
2. Calculer le transfert thermique fourni par la résistance chauffante lors de la transformation.

Exercice de cours F. Mesure de l'enthalpie massique de fusion de l'eau

Dans un calorimètre parfaitement calorifugé de capacité thermique $C = 100 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, on place une masse $m_1 = 100$ g d'eau liquide. À l'équilibre, la température de l'eau est $T_1 = 19,4^\circ\text{C}$.

On ajoute alors une masse $m_2 = 60$ g de glace pilée à la température de fusion. On mélange, toute la glace fond et la température atteinte la valeur $T_2 = 11,3^\circ\text{C}$ à l'équilibre.

Déterminer la valeur de l'enthalpie massique de fusion de l'eau.

Exercice 1. Calorimétrie (★)

Dans un calorimètre parfaitement calorifugé, on introduit une masse $m_1 = 50$ g d'eau. À l'équilibre thermique, la température est $T_1 = 20,0^\circ\text{C}$.

On ajoute une masse $m_2 = 50$ g d'eau de température $T_2 = 40,0^\circ\text{C}$. On mélange et une fois l'équilibre thermique à nouveau atteint, on mesure une température $T_{eq} = 28,6^\circ\text{C}$.

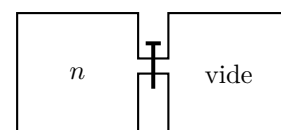
1. Déterminer la « valeur en eau » m_e du calorimètre, c'est-à-dire la masse d'eau ayant la même capacité thermique que le calorimètre.

On introduit alors dans le calorimètre un bloc de cuivre de masse $m_3 = 125$ g chauffé dans un bain thermostaté à la température $T_3 = 64,3^\circ\text{C}$.

2. Déterminer la température de l'eau à l'équilibre. On donne la capacité thermique massique (supposée constante) de l'eau $c_e = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et du cuivre $c_{Cu} = 385 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Exercice 2. Détente de Joule et Gay-Lussac (★)

Au XIX^{ème} siècle, Joule et Gay-Lussac imaginait le dispositif suivant pour étudier les propriétés des gaz. Deux compartiments de même volume $V_0 = 2,0$ L aux parois calorifugées et indéformables communiquent par un robinet. Initialement le robinet est fermé, l'un des compartiments est rempli d'une quantité $n = 3,0$ mol de gaz argon en équilibre à la température T_i tandis que l'autre compartiment est vide. On ouvre le robinet (avec un travail négligeable) et on attend l'établissement d'un nouvel état d'équilibre. On mesure un abaissement de température de $8,5$ K.



1. Montrer que cette transformation se fait sans variation d'énergie interne.
2. L'argon se comporte-t-il comme un gaz parfait ?

On adopte le modèle de van der Waals pour lequel l'énergie interne s'écrit : $U = nCT - an^2/V$ avec $C = 12 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et a est un coefficient caractéristique de l'argon.

3. Que représente C ? Sa valeur est-elle cohérente avec la nature de l'argon ?
4. Déterminer la valeur numérique de a .

Exercice 3. Compression brutale d'un gaz (★★)

Un cylindre vertical de section $S = 5 \text{ cm}^2$ est fermé par un piston de masse négligeable libre de se déplacer verticalement. L'ensemble est calorifugé.

Il contient $n = 1$ mol d'un gaz parfait de capacité thermique molaire $C_{vm} = 5R/2$, à la température initiale $T_i = 293$ K. L'air extérieur a pour pression $P_0 = 1$ bar.

On pose brutalement une masse $m = 1$ kg sur le piston, le système évolue jusqu'à atteindre un nouvel état d'équilibre de pression P_f , de volume V_f et de température T_f .

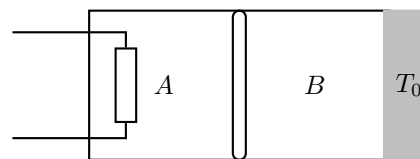
1. Donner la pression P_i et le volume V_i du gaz dans l'état initial.
2. Caractériser la transformation réalisée.
3. Exprimer et calculer la pression P_f dans l'état final.
4. Exprimer la variation d'énergie interne pendant la transformation en fonction de P_f , P_i , V_f et V_i .
5. Exprimer le travail en fonction des mêmes grandeurs.
6. Que vaut le transfert thermique dans cette transformation ? En déduire une relation entre P_f , P_i , V_f et V_i à l'aide du premier principe.
7. En déduire le volume et la température dans l'état final.

Exercice 4. Échauffement des disques de frein (★★)

Une auto de $1,5$ t roulant à $108 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ sur une route horizontale, s'arrête brusquement à l'aide de ses 4 freins à disques. En assimilant ces derniers à des cylindres de 12 cm de rayon et $1,5$ cm d'épaisseur, constitués de fonte de masse volumique $7,2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ et de capacité thermique massique $450 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, calculer leur élévation de température maximale.

Exercice 5. Résistance chauffante dans une enceinte à piston (★★)

Un cylindre horizontal est divisé en deux compartiments A et B , séparés par un piston mobile. Les parois ainsi que le piston sont calorifugés, à l'exception de la base du compartiment B qui est en contact thermique avec un thermostat à la température $T_0 = 273\text{ K}$. Dans l'état initial les deux compartiments contiennent le même volume $V_0 = 2\text{ L}$ d'hélium (considéré comme parfait) à la température T_0 et à la pression $P_0 = 1\text{ bar}$. Le gaz du compartiment A est chauffé à la température $T_1 = 333\text{ K}$ de façon quasistatique à l'aide d'une résistance chauffante.



1. Quelle est la valeur de γ pour l'hélium ?
2. Déterminer les volumes finaux des deux enceintes ainsi que la pression finale.
3. Calculer la variation d'énergie interne de chacune des enceintes A et B ainsi que celle de l'ensemble $\{A + B\}$.
4. Quelle est la nature de la transformation du gaz de l'enceinte B ? En déduire le travail échangé entre les enceintes A et B et le transfert thermique Q_B reçu par le gaz de l'enceinte B .
5. Déterminer le transfert thermique Q_A reçu par le gaz de l'enceinte A .
6. La résistance chauffante $R = 100\ \Omega$ est parcourue par un courant $I = 0,10\text{ A}$. Quelle est la durée de l'expérience ?

Exercice 6. Mélange eau-glace (★★★)

Une enceinte calorifugée en contact avec l'atmosphère contient la masse $m_1 = 100\text{ g}$ d'eau liquide de température initiale $T_1 = 290\text{ K}$ et de capacité thermique massique à pression constante $c_1 = 4,16\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. On y introduit la masse m_2 de glace de température initiale $T_2 = 260\text{ K}$, de capacité thermique massique à pression constante $c_2 = 2,09\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. On négligera la variation des capacités thermiques avec la température. On donne l'enthalpie de fusion de la glace sous la pression atmosphérique $L_f = 333\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1. Déterminer les valeurs de m_2 pour lesquelles le système à l'équilibre est constitué respectivement :
 - (a) de glace à 0°C ,
 - (b) d'eau liquide à 0°C .
2. Préciser l'état du système selon la valeur de m_2 .
3. On prend $m_2 = 30\text{ g}$. Déterminer la composition du système dans l'état final.

Exercice 7. Chauffage d'un bâtiment (★★★)

Un bâtiment, de capacité thermique $C = 7,6 \times 10^7\text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, est chauffé à la température uniforme $T_1 = 20^\circ\text{C}$ par un chauffage central de puissance $P_1 = 32\text{ kW}$ constante, la température extérieure étant égale à $T_0 = 3^\circ\text{C}$. On suppose que la puissance du transfert thermique perdu à travers les murs du bâtiment vaut $\mathcal{P} = aC(T - T_0)$ avec $a = 1,9 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$.

1. À la date $t = 0$, le chauffage est arrêté. En raisonnant sur un intervalle de temps infinitésimal dt , établir l'équation différentielle vérifiée par $T(t)$.
2. Au bout d'une durée de 6 h, quelle est la température du bâtiment ?
3. On remet alors le chauffage en marche. Exprimer puis calculer la température T_∞ théoriquement atteinte au bout d'une durée très grande.
4. Calculer la durée au bout de laquelle le bâtiment aura retrouvé sa température initiale T_1 .

Réponses

Exercice 1 : 1. $m_3 = 16\text{ g}$; 2. $T'_{eq} = 31,8^\circ\text{C}$.

Exercice 2 : 4. $a = 0,14\text{ Pa} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{mol}^{-2}$.

Exercice 3 : 1. $V_i = 2,44 \times 10^{-2}\text{ m}^3$; 3. $P_f = 1,20\text{ bar}$; 7. $V_f = 2,15 \times 10^{-2}\text{ m}^3$; $T_f = 309\text{ K}$.

Exercice 4 : $\Delta T_{\max} = \Delta U_{\max}/C = 77\text{ K}$.

Exercice 5 : 2. $V_A = 2,20\text{ L}$; $V_B = 1,80\text{ L}$; $P_f = 1,11\text{ bar}$; 3. $\Delta U_{\{1+2\}} = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 65,9\text{ J}$; 4. $W_B = -Q_B = 20,9\text{ J}$; 5. $Q_A = 86,8\text{ J}$; 6. $\Delta t = 87\text{ s}$.

Exercice 6 : 1. (a) $1,5\text{ kg}$; (b) 20 g ; 3. composition : $118,8\text{ g}$ d'eau liquide et $11,2\text{ g}$ de glace.

Exercice 7 : 2. $T(6\text{ h}) = 14,3^\circ\text{C}$; 3. $T_\infty = 25,2^\circ\text{C}$; 4. $t = 3,9 \times 10^4\text{ s}$.