Thermodynamique 1 : Introduction à la thermodynamique

Exercice 1 : Pression d'équilibre

On considère un vérin cylindrique consitué d'un tube de section $S = 10\,\mathrm{cm}^2$ et d'un piston mobile sans frottement solide, de masse m, qui sépare l'air à l'intérieur du vérin, de pression P, de celui à l'extérieur, de pression $P_0 = 1{,}0\,\mathrm{bar}$.

Q.1 Quelle masse m_0 a un poids égal à la force de pression exercée par P_0 sur la surface S ?

Q.2 Exprimer la pression P dans le cylindre en fonction de S, m, g et P_0.

Q.3 Si le piston est en aluminium d'épaisseur $e = 5\,\mathrm{mm}$ et de masse volumique $\rho_{\text{alu}} = 2700\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$, quelle est la différence $P - P_0$? Commenter.

Q.4 On ajoute une masse M sur un piston de masse négligeable et de section S ; quelle valeur doit-on choisir pour M afin d'obtenir une pression à l'intérieur égale à $P_1 = 1{,}5\,\mathrm{bar}$?

Exercice 2 : Approche microscopique

Q.1 Estimer l'ordre de grandeur de la vitesse quadratique moyenne des atomes d'un gaz d'hélium dans l'atmosphère à $20\,°\mathrm{C}$.

Q.2 Redémontrer l'expression de l'énergie interne et de la capacité thermique d'un gaz parfait monoatomique.

Q.3 Pour un gaz parfait à la pression atmosphérique et à la température $20\,°\mathrm{C}$, estimer l'ordre de grandeur du libre parcours moyen en considérant que les molécules sont des sphères dures de rayon $r = 0{,}3\,\mathrm{nm}$.

Q.4 Estimer la durée τ entre deux collisions.

Exercice 3 : Pression de pneumatiques

En hiver, par une température extérieure de $-10\,°\mathrm{C}$, un automobiliste règle la pression de ses pneus à $p_1 = 2{,}0\,\mathrm{atm}$, pression préconisée par le constructeur. Cette valeur est affichée sur un manomètre qui mesure l'écart entre la pression des pneumatiques et la pression atmosphérique. On rappelle que $1\,\mathrm{atm}{=}1{,}013 \times 10^5\,\mathrm{Pa}$.

Q.1 Quelle serait l'indication p_2 du manomètre en été à $30\,°\mathrm{C}$? On suppose que le volume des pneus ne varie pas et qu'il n'y a aucune fuite du niveau de ce dernier.

Q.2 Calculer la variation relative de pression due au changement de température. Conclure.

Exercice 4 : Équilibre d'un piston

Un cylindre vertical fermé aux deux bouts est séparé en deux compartiments égaux par un piston homogène, se déplaçant sans frottement. La masse du piston par unité de surface est $\sigma = 1360\,\mathrm{kg\cdot m^{-2}}$. Les deux compartiments contiennent un gaz parfait à la température $t_1 = 0\,°\mathrm{C}$. La pression qui règne dans le compartiment supérieur est égale à $P_{\mathrm{H}} = 0{,}133\,\mathrm{bar}$. L'intensité de la pesanteur est $g = 10\,\mathrm{m\cdot s^{-2}}$.

Q.1 En écrivant que le piston est à l'équilibre, déterminer la pression, en bars, du gaz dans le compartiment du bas.

Q.2 On porte les deux compartiments à $t_2 = 100\,°\mathrm{C}$. De combien se déplace le piston ?

Exercice 5 : Gonflage d'un pneu

On assimile l'air à un gaz parfait.

Q.1 Un pneu sans chambre (de volume supposé constant) est gonflé à froid ($t = 20\,°\mathrm{C}$) sous une pression de $2{,}1\,\mathrm{bar}$. Après avoir roulé un certain temps, le pneu affiche une pression de $2{,}3\,\mathrm{bar}$. Quelle est sa température t_f ?

Q.2 Un pneu de volume $V_1 = 50\,\mathrm{L}$ est gonflé au moyen d'air comprimé contenu dans une bouteille de volume $V_0 = 80\,\mathrm{L}$ sous $P_0 = 15\,\mathrm{bar}$. Si la pression initiale dans le pneu est nulle et la pression finale $P_1 = 2{,}6\,\mathrm{bar}$, déterminer :

a) la pression P dans la bouteille à la fin du gonflage d'un pneu ;

b) le nombre de pneus que l'on peut ainsi gonfler à température constante.

Exercice 6 : Équation d'état

Q.1 Calculer le volume molaire dans les conditions normales de température et de pression d'un gaz parfait. Doit-on préciser la nature du gaz ?

Q.2 Le volume d'une bouteille d'air comprimé est égal à $5{,}0\,\mathrm{L}$. Calculer la masse de dioxygène contenu dans la bouteille sachant que la pression de l'air dans la bouteille est de 50 bar et la température de 25 °C. La fraction molaire du dioxygène dans l'air est de 0,21.

Exercice 7 : Enceinte à deux compartiments

Une même quantité n de deux gaz parfaits identiques est placée dans les deux compartiments d'une enceinte. Ces compartiments sont séparés par un piston mobile, imperméable à la chaleur, dont la section est notée S. initialement, ces deux gaz ont la même température T_0, le même volume V_0, la même pression P_0 et la même capacité thermique à volume constant C_V. Le piston est initialement au centre de l'enceinte, cette position servant d'origine à l'axe des abscisse Ox.

Q.1 On élève la température du compartiment de gauche jusqu'à une valeur $T_F = 330\,\mathrm{K}$ tout en maintenant le compartiment de droite à la température T_0. Calculer l'abscisse x du piston.

Q.2 Calculer les variations d'énergie interne ΔU_1 et ΔU_2 du gaz contenu respectivement dans les compartiments de gauche et de droite, puis calculer la variation ΔU de l'ensemble constitué par les deux gaz.

Q.3 Le compartiment de gauche constitue-t-il un système isolé pendant l'évolution ? Même question pour celui de droite et enfin pour le système entier ?

Donnée : $T_0 = 300\,\mathrm{K}$, $P_0 = 1{,}00 \times 10^{-5}\,\mathrm{Pa}$, $V_0 = 10{,}0\,\mathrm{L}$; $S = 200\,\mathrm{cm}^2$ et $C_V = 8{,}32\,\mathrm{J \cdot K^{-1}}$.

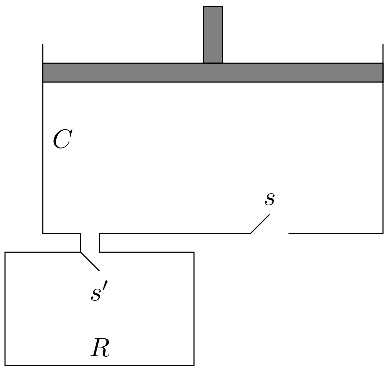
Exercice 8 : Étude d'un compresseur

Un compresseur est constitué de la façon suivante : un piston se déplace dans un cylindre C qui communique par des soupapes s et s' respectivement avec l'atmosphère (pression P_a) et avec le réservoir R contenant l'air comprimé. Le réservoir R contient initialement de l'air considéré comme gaz parfait à la pression $P_0 \geqslant P_\mathrm{a}$.

Le volume du réservoir R, canalisations comprises, est V. Le volume offert au gaz dans C varie entre un volume maximum V_M et un volume minimum V_m, volume nuisible résultant de la nécessité d'allouer un certain espace à la soupape s.

- La soupape s s'ouvre lorsque la pression atmosphérique P_a devient supérieure à la pression dans le cylindre C et se ferme pendant la descente du piston.
- La soupape s' s'ouvre lorsque la pression dans le réservoir devient supérieure à celle du gaz dans le cylindre C et se ferme pendant la montée du piston.

Au départ, le piston est dans sa position la plus haute ($V = V_\mathrm{M}$). s' est fermée, s est ouverte et le volume V_M est empli d'air à la pression P_a.



Q.1 En supposant que le piston se déplace assez lentement pour que l'air reste à température constante, calculer le volume V_1' pour lequel s' s'ouvre, en fonction de P_0, P_a et V_M.

Q.2 Calculer la pression P_1 dans le réservoir R après le premier aller et retour.

Q.3 En écrivant une condition sur V_1', calculer la valeur P_max au-dessus de laquelle la pression ne peut pas monter dans le réservoir.

Q.4 Calculer la pression P_n dans le réservoir R après n allers et retours du piston.

Q.5 Donner la valeur limite de P_n quand $n \gg 1$. Comparer cette limite avec P_max.

Q.6 Calculer P_1 et P_max avec $V = 5\,\mathrm{L}$, $V_\mathrm{M} = 0{,}25\,\mathrm{L}$, $V_\mathrm{m} = 10\,\mathrm{cm}^3$, $P_0 = P_\mathrm{a} = 1\,\mathrm{bar}$.

Thermodynamique 2 : Énergie échangées, transformations

Exercice 1 : Caractériser des transformations

Pour chaque transformation proposée, déterminer si elle est isochore, isobare, monobare, isotherme, monotherme, adiabatique et mécaniquement lente, quasi statique, ou aucun des deux. Si elle a lieu au contact d'un barostat ou d'un thermostat, justifier pourquoi le réservoir peut être considéré comme tel.

Q.1 Transformation subie par un gâteau à température ambiante, introduit dans un four à 200 °C.

Q.2 Une mole de gaz est comprimée très lentement de 1 bar à 2 bar en contact thermique avec l'athmosphère à travers des parfois diathermanes.

Q.3 Deux gaz sont séparés par une cloison dans un récipient de volume total constant et isolé thermiquement de l'extérieur. On considère la transformation subie par l'ensemble des deux gaz lorsque l'on retire la cloison.

Exercice 2 : Lecture de diagrammes

Q.1 Tracer sommairement les diagrammes (P, ν) et (P, T) du diazote avec les données fournies. Placer les différents domaines.

Données :

- point triple : $P_t = 0{,}13\,\text{bar}$; $T_t = 63\,\text{K}$
- point critique : $P_c = 34\,\text{bar}$; $T_c = 126\,\text{K}$.

Q.2 Démontrer la règle des moments.

Exercice 3 : Transformations d'un gaz parfait

On fait passer une certaine quantité de gaz parfait de capacité thermique à volume constant C_V d'un état d'équilibre A (P_A, V_A, T_A) à un autre état d'équilibre B ($P_B = 3P_A$, V_B, T_B) par deux chemins distincs :

1. α : isochore AC puis isobare CB ;
2. β : isotherme réversible AB.

Q.1 Représenter sur le diagramme de Clapeyron le chemin α et le chemin β.

Q.2 Déterminer T_B et V_B.

Q.3 Déterminer W_α le travail reçu par le système lors du chemin α.

Q.4 Déterminer W_β le travail reçu par le système lors du chemin β.

Q.5 Calculer $\Delta U_{A\to B}$.

Q.6 Calculer $\Delta U_{A\to C}$ et $\Delta U_{C\to B}$.

Exercice 4 : Détente d'un gaz parfait

On enferme n moles d'un gaz parfait monoatomique dans un cylindre vertical aux parois diathermanes clos par un piston sans masse de section S. Le piston est maintenu de sorte que le gaz soit comprimé à la pression $P_A = 5P_0$ où P_0 est la pression atmosphérique extérieure. Le gaz occupe initialement le volume V_A. La température extérieure est T_0. L'ensemble est à l'équilibre. On réalise deux expériences à partir de ce même état initial :

- On relâche brutalement le piston et on attend l'équilibre.
- On relâche très lentement le piston de façon à ce que le système passe par une suite d'états d'équilibre infiniment voisins.

Q.1 Caractériser les transformations et déterminer l'état final dans chaque cas.

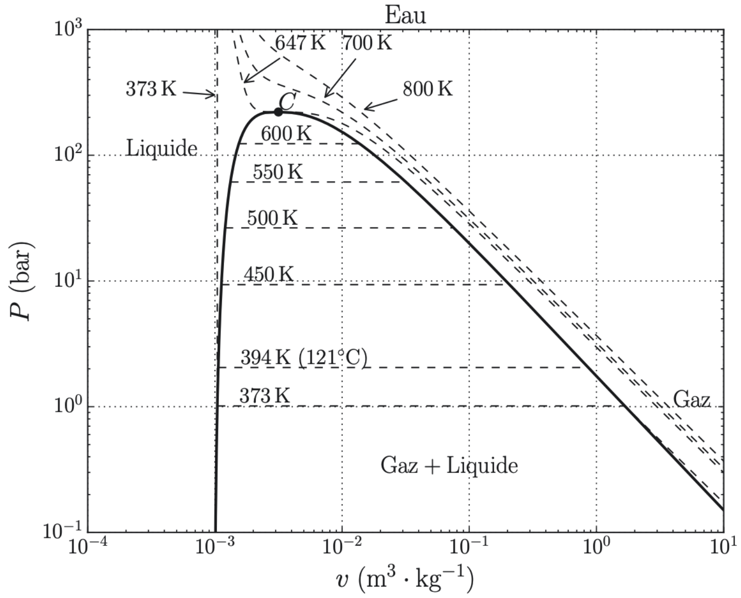
Q.2 Déterminer le travail reçu par le gaz au cours de chaque transformation. Conclure.

Q.3 Déterminer la variation d'énergie interne dans chaque cas. Commenter.

Exercice 5 : Chauffage isobare

On considère une masse $m = 0{,}50\,\text{kg}$ d'eau sous forme de liquide saturant, enfermée dans un cylindre vertical fermé à son extrémité supérieur par un piston sans masse, pouvant coulisser le long des parois du cylindre sans frottement. La pression extérieure P_e est constante, égale à 2 bar, et la surface de base du cylindre de $5{,}0\,\text{cm}^2$. La figure ci-contre montre le diagramme de Clapeyron de l'eau, de masse molaire $M_{\text{eau}} = 18\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

La température d'équilibre liquide-vapeur de l'eau sous 2 bar est $T_0 = 121\,°\mathrm{C}$.



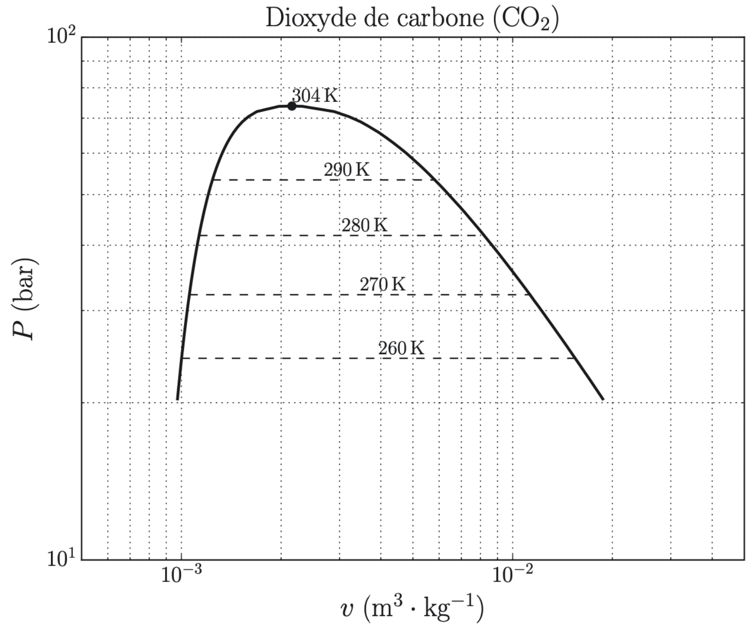
Q.1 Quel est la volume occupé par la masse m d'eau ? Placer le point I correspondant à l'état initial sur le diagramme de Clapeyron.

Q.2 On chauffe ensuite lentement le contenu du récipient, en maintenant la pression extérieure constante, jusqu'à ce que le volume occupé par le contenu du récipient soit de $0{,}9\,\mathrm{m}^3$. Placer le point F correspondant à l'état final sur le graphe et estimer l'ordre de grandeur de la température finale atteinte.

Q.3 Dessiner l'allure du diagramme (P, T) de l'eau et y placer les point I et F.

Exercice 6 : Stockage sous contrôle

On cherche à stocker avec un maximum de sûreté un kilogramme de dioxyde de carbone sous forme d'un mélange liquide-vapeur, enfermé dans une enceinte indéformable de volume V_0, à la température $T_i = 260\,\mathrm{K}$. Le récipient conetenant le fluide est prévu pour résister jusqu'à une pression de 50 bar. La figure suivante montre le diagramme de Clapeyron du dioxyde de carbone, de masse molaire $m_{\mathrm{CO_2}} = 44\,\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$.



Q.1 Indiquer sur ce diagramme les zones correspondant au dioxyde de carbone liquide, gazeux, et diphasé.

Q.2 Compléter ce diagramme en traçant l'allure des isothermes $T = 260\,\mathrm{K}$ et $T = 290\,\mathrm{K}$.

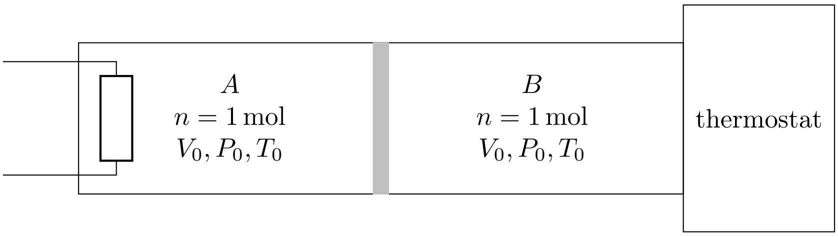
Q.3 Déduire de la lecture de ce diagramme la valeur de la pression de vapeur saturante à la température T_i, ainsi que les volumes massiques du liquide saturant et de la vapeur saturante à cette température.

Q.4 Le récipient subit une élévation accidentelle de température l'amenant à 290 K. Comment choisir V_0 pour que le récipient n'explose pas ? Dans quelle zone faut-il absolument éviter de se placer ?

Thermodynamique 3 : Le premier principe

Exercice 1 : Chauffage d'une enceinte

On étudie le système ci-contre. Les enceintes contiennent des gaz parfaits et l'enceinte A est parfaitement calorifugée. On note γ le rapport des capacités thermiques. On chauffe l'enceinte A jusqu'à la température T_1 par la résistance chauffante. Les transformations seront considérées comme quasistatiques.



Q.1 Déterminer les volumes finaux des deux enceintes ainsi que la pression finale.

Q.2 Calculer la variation d'énergie interne de chacune des enceintes A et B ainsi que celle de l'ensemble $\{A + B\}$.

Q.3 Quelle est la nature de la transformation de l'enceinte B ? En déduire le travail W reçu par B de la part de A ainsi que le transfert thermique Q_1 reçu par B de la part du thermostat.

Q.4 Déterminer le transfert thermique Q_2 fourni par la résistance.

Exercice 2 : Valeur en eau d'un calorimètre

On mélange 95 g d'eau à 20 °C et 71 g d'eau à 50 °C dans un calorimètre dont la température initiale est 20 °C.

Q.1 Quelle est la température finale à l'équilibre, en négligeant l'influence du calorimètre ?

Q.2 Expérimentalement on obtient 31,3 °C. Expliquer.

Q.3 En déduire la valeur en eau du calorimètre.

Exercice 3 : Détermination de la capacité thermique massique du cuivre

Dans un calorimètre dont la valeur en eau est de 41 g, on verse 100 g d'eau. Une fois l'équilibre thermique atteint, on mesure une température de 20 °C. On plonge alors une barre métallique dont la masse est 200 g et dont la température initiale est de 60 °C. À l'équilibre, on mesure une température de 24,5 °C.

Q.1 Déterminer la capacité thermique massique du métal.

On donne : la capacité thermique massique de l'eau $c_{\text{eau}} = 4{,}18\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$ et on suppose que les capacités thermiques massiques sont constantes dans le domaine de températures considérées.

Exercice 4 : Calorimétrie et transition de phase

Un calorimètre est un récipient dont les parois sont conçues de manière à minimiser les échanges thermiques avex l'extérieur ; on pourra donc les supposer athermanes. Le calorimètre de capacité $C = 230\,\mathrm{J\cdot K^{-1}}$ contient initialement une masse $m_1 = 200\,\mathrm{g}$ d'eau liquide à $t_1 = 50{,}0\,°\mathrm{C}$ avec laquelle il est en équilibre thermique. On introduit alors une masse $m_2 = 50{,}0\,\mathrm{g}$ de glace à $t_2 = -10\,°\mathrm{C}$. On attend que l'équilibre thermique soit atteint, et on constate alors que la glace a entièrement fondu et que la température finale est $t_f = 27{,}9\,°\mathrm{C}$. La transformation a lieu sous la pression atmosphérique constante.

Données : capacité thermique de la glace : $c_g = 2{,}06\,\mathrm{kJ\cdot K^{-1}\cdot kg^{-1}}$ et capacité thermique de l'eau liquide : $c_l = 4{,}18\,\mathrm{kJ\cdot K^{-1}\cdot kg^{-1}}$.

Q.1 Déduire de cette expérience l'enthalpie de fusion l_f de la glace à 0 °C.

Q.2 Faut-il fournir d'avantage de transfert thermique, à pression constante, pour augmenter la température de 1 kg d'eau liquide de 0 °C à 100 °C, ou pour faire fondre 1 kg de glace à 0 °C ?

Exercice 5 : Transformation cyclique du gaz parfait

Une mole de gaz parfait diatomique ($\gamma = \frac{7}{5}$) subit la transformation cyclique constituée des étapes suivantes :

- échauffement isobare à partir de $P_0 = 1\,\mathrm{bar}$, $t_0 = 0\,°\mathrm{C}$ tel que le volume ait triplé, sa température atteint alors T_1 ;
- compression isotherme pour revenir au volume initial, la pression étant alors P_1 ;
- refroidissement isochore qui le ramène à l'état initial.

Q.1 Représenter le cycle suivi dans le diagramme de Clapeyron.

Q.2 Calculer pour chaque étape les transferts thermiques Q échangés, les travaux W échangés ainsi que les variations ΔU de l'énergie interne ainsi que celle de l'entahlpie ΔH.

Q.3 Calculer W_{total} et Q_{total} sur le cycle complet. Commentaires. Calculer également ΔU_{total} et ΔH_{total}.

Exercice 6 : Compressions isotherme et monotherme d'un gaz parfait

Un gaz parfait est contenu dans un cylindre clos par un piston. La température initiale du gaz est égale à la température extérieure $T_1 = 293\,\mathrm{K}$, sa pression $P_1 = 1\,\mathrm{bar}$ et son volume $V_1 = 5\,\mathrm{L}$. On néglige une nouvelle fois la force pressante due au poids du cylindre devant celle due à la pression atmosphère. Les parois du cylindre et le piston sont de bons conducteurs de la chaleur.

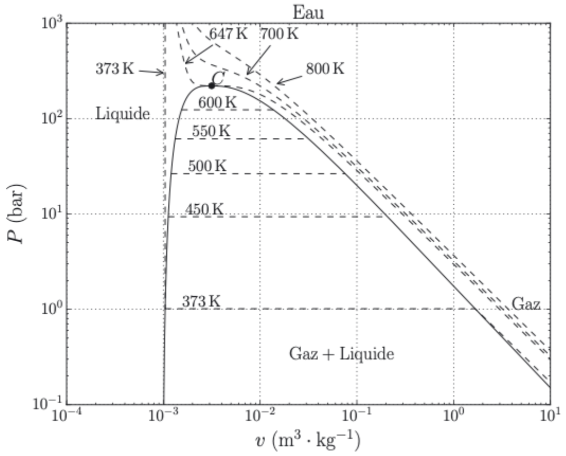
Q.1 On appuie lentement sur le piston de manière à assurer l'équilibre thermique à chaque instant jusqu'à ce que le gaz atteigne la pression $P_2 = 10\,\mathrm{bar}$. Calculer le volume final V_2 occupé par le gaz, sa variation d'énergie interne ΔU_2 ainsi que le travail W_2 et le transfert thermique Q échangés.

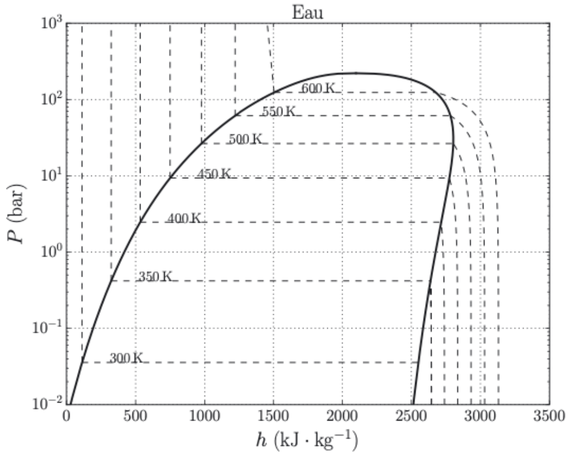
Q.2 On applique d'un seul coup (c'est-à-dire brutalement) une surppression extérieure de telle sorte que la pression extérieure passe brusquement de P_1 à P_2. On attend qu'un état d'équilibre thermique se réinstaure avec l'extérieur. Calculer le volume final V_2' occupé par le gaz, sa variation d'énergie interne $\Delta U_2'$ ainsi que W_2' et Q'.

Exercice 7 : 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 occupoe 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, $R = 8{,}31\,\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}}$, la capacité thermique massique à volume constante de l'eau vapeur, $c_V = 1{,}6\,\mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$ ainsi que la masse molaire de l'eau, $M_{H_2O} = 18\,\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$.





Q.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.

Q.2 Placer les points I et K sur le diagramme (P, h).

Q.3 Calculer le travail reçu par l'eau au cours de la transformation IK.

Q.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.

Q.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.

Q.6 Calculer le travail des forces de pression reçu par l'eau au cours de la transformation KF.

Q.7 Déterminer la variation d'énergie interne entre K et F. En déduire le transfert thermique reçu par l'eau Q_{KF}.

Thermodynamique 4 : Le second principe

Exercice 1 : Refroidissement d'un solide

Dans une enceinte thermiquement isolée, on met en contact thermique deux systèmes Σ_1 et Σ_2 constitués chacun d'un corps pur monophasé, de températures respectives T_1 et T_2 et de capacités thermiques à pression constate respectives C_1 et C_2. La transformation est isobare. On rappelle que pour une phase condensée idéale de capacité thermique C :

$$\Delta S = C \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right)$$

Q.1 Déterminer la température finale des deux systèmes ?

Q.2 Exprimer l'entropie créée dans la transformation.

Exercice 2 : Fonte de glace dans l'eau

Dans un récipient parfaitement calorifugé, on met un morceau de glace à la température de $0\,^\circ\mathrm{C}$ dans un kilogrammme d'eau initialement à la température de $20\,^\circ\mathrm{C}$.

On donne la capacité thermique massique de l'eau $c = 4{,}2 \times 10^3\ \mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$ et l'enthalpie massique de fusion de la glace $\Delta h_{\text{fus}} = 336 \times 10^3\ \mathrm{J \cdot kg^{-1}}$.

Q.1 Déterminer la masse minimale de glace nécessaire pour que l'eau soit à la température de $0\,^\circ\mathrm{C}$ dans l'état final.

Q.2 Calculer dans ce cas ΔS_e la variation d'entropie de l'eau initialement à l'état liquide.

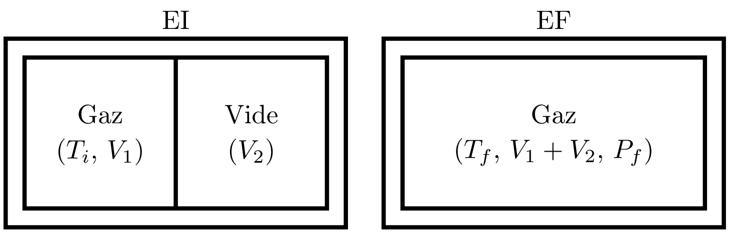
Q.3 Même question pour ΔS_{ge} pour l'eau initialement sous forme de glace.

Q.4 En déduire le bilan d'entropie de l'évolution. Conclure.

Exercice 3 : Détente de Joule Gay-Lussac

Un récipient calorifugé rigide et indéformable comporte deux chambres de volumes V_0 et V_1 identiques. Dans l'état initial, celui de gauche contient $n = 1{,}0\,\mathrm{mol}$ de gaz parfait à la température T_i et l'autre est vide. On ouvre le robinet permettant la communication entre les deux compartiments. Dans l'état d'équilibre final, le gaz occupe les deux compartiments. Pour un gaz parfait de coefficient γ on rappel que :

$$\Delta S = \frac{nR\gamma}{\gamma - 1} \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) - nR \ln\left(\frac{P_f}{P_i}\right)$$



Q.1 Pourquoi la transformation est-elle adiabatique ?

Q.2 Que vaut la température finale T_f du gaz ?

Q.3 Établir l'expression littérale puis numérique de l'entropie créée entre l'état initial et l'état final.

Exercice 4 : Thermalisation fractionnée

Une masse $m = 1{,}0\,\mathrm{kg}$ d'eau liquide à $T_0 = 273\,\mathrm{K}$ est mise en contact avec un thermostat à $T_f = 300\,\mathrm{K}$ sous pression atmosphérique.

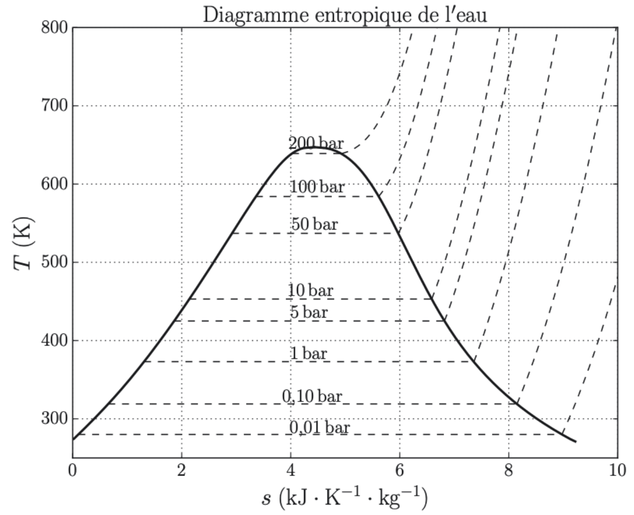
Q.1 Exprimer puis calculer l'entropie créée. Quelle est la cause de la création d'entropie ?

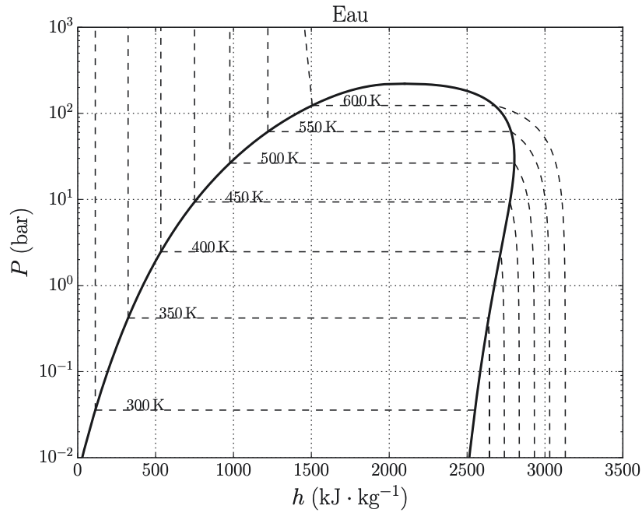
Q.2 On suppose maintenant que l'eau est d'abord mise en contact avec un premier thermostat à la température $T_1 = 285\,\mathrm{K}$ jusqu'à ce qu'elle atteigne cette température, puis elle est mise en contact avec le thermostat à T_f. Calculer de nouveau l'entropie créée. Pourquoi trouve-t-on une valeur inférieure à celle de la question précédente ?

Q.3 On opère maintenant en étapes : l'eau, initialement à T_0, est mise successivement en contact avec N thermostat de températures T_k vérifiant $T_k = T_0 + k\dfrac{T_f - T_0}{N}$ avec $k \in [0; N]$. Calculer l'entropie créée. Que devient-elle lorsque N tend vers l'infini ? Comment l'interpréter ?

Exercice 5 : Histoires d'eau

René, jeune physicien prodige, décide de faire subir à une masse $m = 2{,}0\,\mathrm{kg}$ d'eau un cycle de transformations, en vue d'étudier son comportement. Partant d'un mélange liquide-vapeur à la température $T_1 = 300\,\mathrm{K}$ (état (1)), il comprime adiabatiquement et de façon réversible ce mélange pour l'amener dans un état de liquide saturant sous la pression $P_2 = 10\,\mathrm{bar}$ (état (2)). Il place ensuite le liquide saturant obtenu en contact thermique avec une source chaude à $T_c = 600\,\mathrm{K}$ et chauffe l'eau de manière isobare jusqu'à ce qu'elle atteigne la température $T_3 = 600\,\mathrm{K}$ (état (3)). Il réalise alors une détente adiabatique réversible ramenant l'eau à $300\,\mathrm{K}$ (état (4)), puis ramène par contact thermique avec une source froide à la température $T_f = 290\,\mathrm{K}$ le système dans l'état (1), de façon isobare.





Q.1 Placer les quatre points (1), (2), (3) et (4) sur les diagrammes (P, h) et (T, s) ci-dessus et tracer l'allure du cycle réalisé par René. On déterminera, si besoin est, le titre en vapeur des différents états.

Q.2 Pour chacune des transformations $(i) \to (j)$, calculer la variation d'enthalpie ΔH_{ij}, le transfert thermique reçus Q_{ij} et la variation d'entropie ΔS_{ij} de l'eau.

Q.3 Que valent la variation d'enthalpie et d'entropie sur le cycle ainsi réalisé ?

Q.4 Pour chacune des transformations, faire un bilan entropique et calculer l'entropie créée. Identifier si nécessaire les causes d'irréversibilité.

Exercice 6 : Solidification d'un liquide surfondu

Lorsqu'on refroidit progressivement un échantillon de corps pur liquide, dans un récipient en parfait état (il ne doit pas y avoir de rayures sur la paroi), le corps reste liquide même en dessous de la température de fusion T_{fus} du corps. Ce phénomène s'appelle la surfusion et on dit que le liquide est surfondu. Cet état d'équilibre est métastable : une très petite perturbation provoque la solidification d'une partie ou de la totalité du liquide surfondu.

Dans l'expérience considérée, un tube à essai contient une masse $m = 0{,}10\,\mathrm{kg}$ d'eau surfondue (donc entièrement liquide, de capacité thermique massique $c_{\text{eau}} = 4{,}18\,\mathrm{kJ\cdot K^{-1}\cdot kg^{-1}}$) à une température T_i inférieure à $T_{\text{fus}} = 273\,\mathrm{K}$, température de fusion de l'eau sous $P_0 = 1\,\mathrm{bar}$.

On fait cesser la surfusion en frappant légèrement sur le tube à essai avec un agitateur. Une partie de l'eau se solidifie presque instantanément. On se propose de faire le bilan d'entropie du système constitué par l'eau lors de cette transformation.

Dans l'état initial, l'eau est liquide à la température T_i, à la pression P_0 imposée par l'atmophsère. Dans l'état final, le système contient une masse $mx_{L,f}$ d'eau liquide et une masse $m(1 - x_{L,f})$ de glace, à la température T_{fus}, sous la pression P_0.

La transformation est extrêmement rapide.

Q.1 Pourquoi la transformation est-elle adiabatique ?

Q.2 Établir l'expression littérale de $x_{L,f}$.

Q.3 Sachant que $\Delta S = C \ln\left(\dfrac{T_f}{T_i}\right)$ pour une phase condensée de capacité thermique C, calculer la variation d'entropie de l'eau liquide lors de la transformation.

Q.4 Établir l'expression littérale puis numérique de l'entropie créée entre l'état initial et l'état final.

Thermodynamique 5 : Machines thermiques

Exercice 1 : Moteur réel

Un moteur réel fonctionnant entre deux sources de chaleur, l'une à $T_{fr} = 400\,\mathrm{K}$, l'autre à $T_{ch} = 650\,\mathrm{K}$, produit 500 J par cycle, pour 1500 J de transfert thermique fourni.

Q.1 Comparer son rendement à celui d'une machine de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources.

Q.2 Calculer l'entropie créée par cycle, notée S_{cr}.

Exercice 2 : Appliquer les bons principes

On considère un système fermé fluide parcourant les cycles thermodynamiques dithermes, au cours desquels il reçoit algébriquement le travail $W = -53\,\mathrm{J}$, le transfert thermique $Q_F = -70\,\mathrm{J}$ de la part de la source froide de température $T_F = 278\,\mathrm{K}$ et le transfert thermique Q_C de la part de la source chaude de température $T_C = 500\,\mathrm{K}$.

Q.1 S'agit-il d'un cycle moteur ou d'un cycle récepteur ?

Q.2 En appliquant le premier principe au fluide sur un cycle, déterminer le transfert thermique Q_C qu'il reçoit algébriquement de la part de la source chaude. Faire l'application numérique.

Q.3 Appliquer ensuite le second principe à ce système. Le fonctionnement est-il réversible ?

Exercice 3 : Cycle de Carnot

Le seul cycle rigoureusement réversible est le cycle de Carnot.

Q.1 Décrire les transformations mises en jeu, en justifiant qualitativement le caractère réversible du cycle.

Q.2 Représenter ce cycle dans le diagramme de Clapeyron (P, ν) pour un gaz parfait, dans le sens moteur.

Q.3 Pour quelles raisons ce cycle n'est-il pas réellement utilisé en pratique ?

Exercice 4 : Moteur de Stirling

On considère un moteur, dit de Stirling, fonctionnant entre une source froide à la température $T_F = 293\,\mathrm{K}$ et une source chaude à la température $T_C = 493\,\mathrm{K}$. Au cours d'un cycle, une mole de gaz parfait subit les transformations suivantes :

- de A à B : compression isotherme quasistatique à T_F,
- de B à C : échauffement isochore (volume V_B),
- de C à D : détente isotherme quasistatique à T_C,
- de D à A : refroidissement isochore (volume V_A).

Données : $R = 8{,}314\,\mathrm{J \cdot K^{-1}}$, $\gamma = 1{,}4$, taux de compression $\alpha = \dfrac{V_A}{V_B} = 5$.

Q.1 Représenter le cycle dans le diagramme de Clapeyron.

Q.2 Quelles sont les étapes réversibles ? Irréversibles du cycle ? Justifier.

Q.3 Déterminer les transferts thermiques reçus par le gaz au cours du cycle.

Q.4 Exprimer le rendement en fonction de T_C, T_F, α et γ. Application numérique.

Q.5 En fait, les moteurs Stirling sont équipés d'un récupérateur de chaleur qui compensent les échanges thermiques lors des transformations isochores. Exprimer puis calculer à nouveau le rendement. Commenter et interpréter.

Exercice 5 : Pompe à chaleur sans transition de phase

Une pompe à chaleur effectue le cycle de Joule inversé suivant. L'air pris dans l'état A de température T_0 et de pression P_0 est comprimé suivant une adiabatique réversible jusqu'au point B où il atteint la pression P_1. L'air est ensuite refroidi à pression constante et atteint la température finale de la source chaude T_1 correspondant à l'état C. L'air est encore refroidi dans une turbine suivant une détente adiabatique réversible pour atteindre l'état D de pression P_0. Il se réchauffe enfin à pression constante au contact de la source froide et retrouve son état initial.

L'air est considéré comme un gaz parfait de rapport des capacités thermiques $\gamma = 1{,}4$, indépendant de la température. On pose $\beta = 1 - \dfrac{1}{\gamma}$ et $a = \dfrac{P_1}{P_0}$.

On prendra $T_0 = 283\,\mathrm{K}$, $T_1 = 298\,\mathrm{K}$, $a = 5$ et $R = 8{,}31\,\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}}$.

Q.1 Représenter le cycle parcouru par le gaz dans un diagramme (P, V).

Q.2 Rappeler les conditions nécessaires pour assurer la validité des formules de Laplace. Donner la formule de Laplace relative à la pression et à la température.

Q.3 En déduire l'expression des températures T_B et T_D des états B et D en fonction de T_0, T_1, a et β. Préciser leurs valeurs numériques.

Q.4 Exprimer l'efficacité e de la pompe à chaleur en fonction des transferts thermiques.

Q.5 En déduire l'expression de e en fonction de a et β. Donner sa valeur numérique.

Q.6 Quelles doivent être les transformations du gaz si on fait fonctionner la pompe à chaleur suivant un cycle de Carnot réversible entre les températures T_0 et T_1 ?

Q.7 Établir l'expression de son efficacité e_r. Donner sa valeur numérique.

Q.8 Comparer e et e_r. Proposer une explication à ce résultat.

Q.9 Déterminer l'expression de l'entropie créée S_c pour une mole d'air au cours du cycle de Joule en fonction de R, β et $x = a^\beta \dfrac{T_0}{T_1}$.

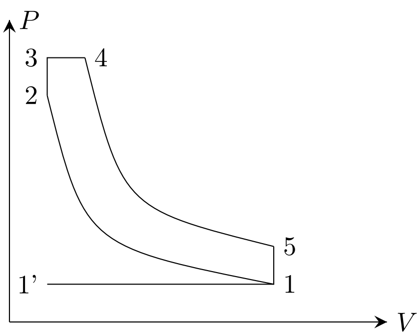
Q.10 Étudier le signe de S_c en fonction de x. Etait-ce prévisible ?

Q.11 Calculer sa valeur ici.

Q.12 Sachant qu'en régime permanent, les fuites thermiques s'élèvent à $P_f = 20\,\text{kW}$, calculer la puissance du couple compresseur-turbine qui permet de maintenir la température de la maison constante.

Exercice 6 : Le moteur Diesel

Dans les moteurs Diesel à double combustion, le cycle décrit par le mélange air-carburant est modélisable par celui d'un système fermé représenté en coordonnées de Watt ci-contre. Après la phase d'admission $1' \to 1$ qui amène le mélange au point 1 du cycle, celui-ci subit une compression adiabatique supposée réversible jusqu'au point 2. Après injection du carburant en 2, la combustion s'effectue d'abord de façon isochore de 2 à 3 puis se poursuit de façon isobare de 3 à 4. La phase de combustion est suivie d'une détente adiabatique à nouveau prise réversible de 4 à 5, puis d'une phase d'achappement isochore $5 \to 1$ puis isobare $1 \to 1'$.



Au point 1 du cycle, la pression $P_m = 1{,}0\,\text{bar}$ et la température $T_m = 293\,\text{K}$ sont minimales. La pression maximale, aux points 3 et 4 vaut $P_M = 60\,\text{bar}$ et la température maximale, au point 4, vaut $T_M = 2073\,\text{K}$. Le rapport volumétrique de compression vaut $\beta = \dfrac{V_M}{V_m} = 17$.

On suppose que le mélange air-carburant se comporte exactement comme l'air, c'est-à-dire comme un gaz parfait diatomique de masse molaire $M = 29\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, et de capacités thermiques respectives C_P et C_V, et on note $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = 1{,}4$.

Q.1 Exprimer les températures T_2, T_3 et T_5 en fonction de P_m, P_M, T_m, T_M et β. Calculer les valeurs numériques.

Q.2 Calculer le transfert thermique massique q_c reçu par l'air au cours de la phase de combustion $2 \to 4$.

Q.3 Calculer le transfert thermique massique q_f échangé avec le milieu extérieur entre les points $5 \to 1$.

Q.4 En déduire le travail massique w échangé au cours d'un cycle.

Q.5 Définir et calculer le rendement de ce moteur. Commenter la valeur trouvée.