Dans tous les exercices, le système considéré sera, sauf mention du contraire, macroscopiquement au repos dans un référentiel galiléen.
On pourra être amené à utiliser les résultats, classiques, des deux premiers exercices pour les suivants. Les gaz seront, sauf mention du contraire, considérés parfaits, de coefficient $\gamma =$ cste.
On précisera la validité de cette dernière approximation.

Exercices d'application : Compressions de gaz parfaits et calorimétrie : indispensables,

Culture en sciences physiques : briquet, ouverture de flacon, mesure de γ,

Corrigés en TD : Compressions de gaz et calorimétrie, mesure de γ, ouverture de ballon

Gaz

Exercice 1 : Compressions d'un gaz parfait en contact avec un thermostat

On considère un gaz parfait en contact avec un thermostat. Il est initialement à l'équilibre thermodynamique sous une pression P_i, son volume étant V_i. Il est comprimé jusqu'à un nouvel état d'équilibre thermodynamique où sa pression est P_f selon deux transformations différentes :

- infiniment lentement,
- brutalement, on peut alors considérer qu'il est soumis à une pression extérieure constante.

Déterminer dans chaque cas le travail des forces de pression, la variation de son énergie interne et le transfert thermique fourni par le thermostat.

Exercice 2 : Transformations adiabatiques d'un gaz parfait

On considère des compressions adiabatiques d'un gaz parfait. Il est initialement à l'équilibre thermodynamique sous une pression P_i, son volume étant V_i et sa température T_i. Il est comprimé jusqu'à un nouvel état d'équilibre où sa pression est P_f selon deux transformations différentes :

Transformation brutale

1. Exprimer le travail des forces de pression reçu par le gaz à l'aide des paramètres d'état initiaux et finaux $(P_i, V_i, T_i$ et $P_f, V_f, T_f)$ du gaz.
2. Exprimer la variation d'énergie interne du gaz à l'aide des températures initiale et finale T_i et T_f et du coefficient $\gamma = \frac{C_{pm}}{C_{vm}}$.
3. En déduire T_f et le travail reçu en fonction de γ et du rapport P_f/P_i.

Transformation infiniment lente

1. Établir une relation entre les variations élémentaires du volume $\mathrm{d}V$ et de la température $\mathrm{d}T$ au cours de la transformation à l'aide du premier principe.
2. Montrer qu'au cours de l'évolution, les paramètres d'état vérifient : $\begin{cases} TV^{\gamma-1} & = cste \\ PV^{\gamma} & = cste \\ T^{\gamma}P^{1-\gamma} & = cste \end{cases}$. Ce sont les lois de Laplace, qu'on retrouvera plus tard.
3. En déduire la variation d'énergie interne du système et le travail des forces de pression.
4. Déduire de la relation $PV^{\gamma} = cste$ la pente $\mathrm{d}P/\mathrm{d}V$ d'une transformation adiabatique infiniment lente dans le diagramme de Clapeyron. Comparer au cas d'une isotherme. Tracer l'allure de ces deux courbes

Exercice 3 : Capacités thermiques

1. Estimer la capacité thermique à volume constant massique de l'air. Comparer à celle de l'eau liquide et commenter.
2. Estimer les capacités thermiques massiques du cuivre et de l'aluminium solides.

On donne $M(\mathrm{Al}) = 27\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$, $\rho(\mathrm{Al}) = 2{,}7\cdot 10^3\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$; $M(\mathrm{Cu}) = 63{,}5\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$, $\rho(\mathrm{Cu}) = 9{,}0\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$, $M(\mathrm{N}) = 14\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$; $M(\mathrm{O}) = 16\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$.

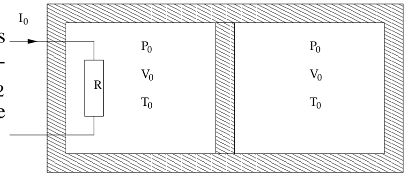
Exercice 4 : Briquet à air

Un briquet à air permet de réduire le volume d'une masse d'air au vingtième de sa valeur. En considérant que la transformation utilisée est adiabatique et infiniment lente, déterminer la pression et la température finale si $\theta_0 = 12\,°\mathrm{C}$, $P_0 = 1\,\mathrm{atm}$ et en prenant $\gamma = 1{,}4$ constant. Quelles sont les variations d'énergie interne et d'enthalpie de cette masse d'air si $V_0 = 10\,\mathrm{cm^3}$.

Comment envisageriez-vous de réaliser un tel briquet et comment l'utiliseriez-vous ? La transformation ressemblerait-elle à celle décrite ?

Exercice 5 : Bilans énergétiques

On considère un cylindre indéformable divisé en deux compartiments par un piston mobile sans frottement. Les parois du cylindre et le piston sont athermanes. Initialement, les deux compartiments $\mathscr{C}_1$ et $\mathscr{C}_2$ contiennent un même volume $V_0 = 1{,}0\,\mathrm{L}$ d'un gaz parfait monoatomique à la pression $P_0 = 1\,\mathrm{bar}$ et à la température $T_0 = 300\,\mathrm{K}$.



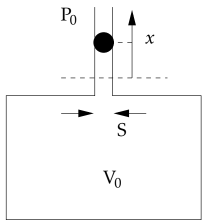
1. Que vaut le rapport γ des capacités thermiques C_p et C_v pour un gaz monoatomique ?
2. Le compartiment $\mathscr{C}_1$ contient un résistor de résistance $r = 200\,\Omega$ et de capacité thermique $C = 4{,}0\,\mathrm{J\cdot K^{-1}}$. On y fait circuler un courant $I_0 = 0{,}2\,\mathrm{A}$ pendant la durée $\Delta t = 50\,\mathrm{s}$.
   (a) On considère dans un premier temps le système formé du gaz dans $\mathscr{C}_2$, du gaz dans $\mathscr{C}_1$ du résistor et du piston. Ce système reçoit-il du travail, un transfert thermique ? Déduire de la variation de son énergie une relation liant les variations ΔT_1 et ΔT_2 des températures des gaz.
   (b) Peut-on traiter ces questions en excluant le résistor du système ?
3. La température finale T_2 du compartiment $\mathscr{C}_2$ est $T_2 = 360\,\mathrm{K}$.
   (a) Déterminer la température finale T_1 compartiment $\mathscr{C}_1$.
   (b) En déduire les volumes V_1, V_2 et les pressions P_1 et P_2.

4. Aurait-on pu négliger la capacité thermique du résistor ?

Exercice 6 : ⚡ Ouverture d'un ballon vide

On a fait le vide dans un ballon à parois rigides athermanes pouvant communiquer grâce à un robinet avec l'atmosphère extérieure (air à la température T_0 et à la pression P_0). On laisse ensuite rentrer rapidement une faible quantité d'air dans le ballon en ouvrant le robinet. En raisonnant sur le système constitué du volume de gaz qui rentre dans le ballon au cours de l'opération, exprimer en fonction de T_0 et du coefficient γ de l'air, la température à l'équilibre de l'air rentré dans le ballon.

Exercice 7 : ⚡ Mesure de γ par la méthode de Rüchardt



Un bille de masse $m_0 = 30\,\text{g}$ peut coulisser sans frottement dans un tube de verre de faible section $s = 4\,\text{cm}^2$. Ce tube surmonte un récipient de volume $V_0 = 10\,\text{L}$. L'ensemble est plongé dans l'atmosphère, de pression uniforme $P_0 = 1\,\text{atm}$.
Le récipient (et la portion de tube sous la bille) contient de l'air qu'on assimilera à un gaz parfait (de coefficient γ constant).

1. Initialement, le système est en équilibre avec l'atmosphère à la température $\theta_0 = 25\,°\text{C}$ et la bille se trouve immobile à la hauteur $h = 50\,\text{cm}$. Déterminer la pression de l'air enfermé (on prendra $g = 9{,}8\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$). On la note P_i

2. On écarte la bille de x_0 ($x_0 s \ll V_0$) à l'instant $t = 0$ et on la relâche sans lui communiquer de vitesse initiale. On désigne par x l'écart par rapport à la position de repos précédente.

   (a) Exprimer la résultante des forces pressantes exercées sur la bille en fonction de γ, P_i, s, x et h à l'aide d'un développement limité pour $sx \ll V_0$. On supposera que la transformation est infiniment lente et adiabatique et on utilisera les lois de Laplace de l'exercice 2.

   (b) En négligeant toutes les formes de dissipation, établir l'équation du mouvement de la bille.

   (c) En déduire la fréquence f de ces petites oscillations et l'expression de γ en fonction des paramètres pertinents. Que vaudra f pour un gaz diatomique aux températures usuelles ?

   (d) Discuter les hypothèses faites. On pourra considérer que le temps moyen entre deux collisions des molécules du gaz est de l'ordre de la ns.

3. Ce phénomène est également à l'œuvre dans le dispositif du *résonateur de Helmholtz*[i], dont une illustration triviale est le son produit quand on souffle sur le goulot d'une bouteille. C'est la colonne d'air dans le goulot qui joue alors le rôle de la bille. Déterminer les ordres de grandeur pertinent et en déduire une estimation de la fréquence des sons ainsi produits, pour une bouteille de bière par exemple.

Autres systèmes

[i] H. von Helmholtz, physicien autrichien (1821-1894).

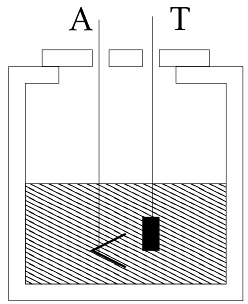
Exercice 8 : Marteau-pilon

Un marteau-pilon de masse $m_P = 1\cdot 10^5\,\text{kg}$ tombe d'une hauteur $h = 3\,\text{m}$ sur un objet en aluminium de masse $m_A = 50\,\text{kg}$. La température du marteau ne varie pratiquement pas alors que celle de l'objet varie de ΔT.

Déterminer ΔT sachant que la masse molaire de l'aluminium est $27\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$. On prendra $g = 9{,}8\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ et la capacité thermique molaire $C_m = 3R$ (formule de Dulong et Petit).

Exercice 9 : Calorimétrie

On détermine les capacités thermiques des corps par des mesures calorimétriques. On utilise pour cela un *calorimètre*, *ie* une enceinte indéformable limitant au maximum les transferts thermiques avec l'extérieur[ii].
On y introduit un agitateur A pour homogénéiser les liquides qui y seront placés ainsi qu'un thermomètre T.



1. Les trous du couvercle permettant le passage du thermomètre et de l'agitateur ne sont pas étanches, l'air à l'intérieur du calorimètre est en contact avec l'atmosphère. Comment décririez-vous les transformations des corps à l'intérieur du calorimètre. En déduire que l'enthalpie des corps introduits vérifie, $\Delta H = Q_p + W_a$ lors des transformations, avec W_a le travail des forces autres que les forces de pression.

   On considère dans toute la suite un calorimètre *idéal*, assurant $Q_p = 0$.

2. Plusieurs techniques de mesures sont utilisées.

   Méthode des mélanges On introduit dans le calorimètre un liquide de capacité thermique connue C_0, en équilibre thermique avec l'enceinte intérieure du calorimètre à $T = T_0$. On introduit ensuite un corps de capacité thermique C inconnue, à la température T. La mesure de la température d'équilibre T_e de l'ensemble permet de déterminer C.

   (a) Un calorimètre contient 95 g d'eau à 20 °C. On ajoute 71 g d'eau à 50 °C. Quelle serait la température d'équilibre si on pouvait négliger la capacité thermique du calorimètre et de ses accessoires (thermomètre et agitateur).

   (b) La température d'équilibre observée est 31,3 °C. En déduire la capacité thermique du calorimètre et des accessoires. On nomme *valeur en eau* du calorimètre la masse d'eau qui aurait la même capacité thermique. Déterminer la valeur en eau de ce calorimètre sachant que $c_{H_2O} = 4{,}18\,\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

   (c) Pourquoi utilise-t-on un liquide ? Doit-on tenir compte de l'air à l'intérieur du calorimètre ?

   Méthode électrique Un résistor est immergé dans un liquide dont on désire connaître la capacité thermique C. De l'énergie est apportée dans le calorimètre par le travail électrique fourni par un générateur à l'extérieur du calorimètre.

   (a) Faire un schéma.

[ii] À cet effet, on utilise un système à double paroi, réfléchissantes pour limiter les transferts thermiques par rayonnement et entre lesquelles on peut éventuellement faire le vide. Ce vide n'est pas indispensable car l'air qui y est emprisonné est la plupart du temps un isolant suffisamment bon.

(b) Le liquide est initialement en équilibre thermique avec la paroi interne du calorimètre à la température T_0. Déterminer la température au bout d'une durée Δt si la résistance du résistor et la tension à ses bornes sont stationnaires.

(c) L'isolation du calorimètre n'est pas parfaite. On peut modéliser ce défaut par un transfert thermique de puissance $\mathscr{P}_{\text{th}} = h(T_{\text{ext}} - T)$. Quel est le signe de h ? Déterminer la nouvelle loi d'évolution de T en fonction du temps.

Changements d'état

Exercice 10 : Changement d'état et état final d'un système

Une enceinte calorifugée en contact avec l'atmosphère de pression $P_0 = 1\,\text{atm}$ 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 $c_1 = 4{,}16\,\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. On y introduit la masse m_2 de glace de température initiale $T_2 = 260\,\text{K}$, de capacité thermique massique à température constante $c_2 = 2{,}09\,\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. On négligera la variation des capacités thermiques avec la température. On donne l'enthalpie de fusion de la glace sous la pression atmosphérique $l_f = 333\,\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$.

1. Déterminer les valeurs du paramètre $x = m_2/m_1$, notées x'' et x' pour lesquelles le système à l'équilibre est constitué respectivement :
   - de glace à $0\,°\text{C}$,
   - d'eau liquide à $0\,°\text{C}$.

   Préciser l'état du système pour $x \leqslant x'$, pour $x \geqslant x''$ et pour $x \in [x'; x'']$

   On notera $T_0 = 273{,}15\,\text{K}$ la température de fusion de la glace à la pression atmosphérique.
2. Calculer numériquement m_2' et m_2''. Estimer le nombre de glaçons correspondant pour un verre d'eau.
3. On prend $m_2 = 30\,\text{g}$. Déterminer la composition du système dans l'état final.

Exercice 11 : Deux vaporisations de l'eau liquide

On réalise la vaporisation totale d'une masse $m = 1{,}0\,\text{g}$ d'eau liquide, initialement sous la pression $P = P_{\text{atm}} = 1{,}0\,\text{bar}$, de deux manières différentes. Dans les deux cas le récipient est placé dans un thermostat à $\theta = 100\,°\text{C}$.

Vaporisation infiniment lente Le récipient est fermé par un piston. Initialement la pression de l'eau est P_{atm} et on déplace infiniment lentement le piston jusqu'à n'avoir plus que de la vapeur. Le volume vaut alors $V_f = 1{,}61\,\text{L}$.

Vaporisation dans le vide On place directement (et rapidement) la masse d'eau dans un même volume V_f. On peut aussi considérer que l'eau liquide est initialement seule, à l'équilibre, dans un récipient dont le volume est égal à son volume massique à P_{atm} et qu'on ouvre un robinet pour lui permettre d'occuper le volume v_f.

1. Dans les deux cas, déterminer les variations d'énergie interne, d'enthalpie de la masse d'eau, puis le travail et le transfert thermique échangé.
2. En conclure, par analogie avec le cas de l'enthalpie massique de changement d'état, ce que représente l'énergie interne massique de changement d'état.

On rappelle $l_v(H_2O) = 2{,}25\cdot 10^6\,\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ à $100\,°\text{C}$.

Exercice 12 : Compresion isotherme d'un réfrigérant

On étudie les transformations thermodynamiques d'un réfrigérant (1,1,1,2-tétrafluoroéthane ou encore R 134 a) dont on donne une partie du diagramme (P, h) ci-dessous (figure 1).

Étude générale

1. Identifier les domaines du liquide, de la vapeur sèche et des états d'équilibre liquide-vapeur. Où se situe le point critique C ?
2. Identifier les isothermes en justifiant leur allure. Quelle est la grandeur constante sur les courbes légendées comme $v = 0{,}040$? En quelle unité cette grandeur est-elle exprimée ?
3. Expliquer comment déterminer l'enthalpie de vaporisation à une température T.
4. Montrer que l'on peut écrire un théorème des moments analogue à celui des isothermes d'Andrews.

Compression isotherme d'un réfrigérant

Dans l'état initial A, le volume massique est $v_i = 0{,}2\,\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$, la température est de $40\,°\text{C}$ (voir la figure 1).

La masse totale de fluide (de masse molaire $M = 102\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$) est $m = 15\,\text{g}$.

On effectue une compression isotherme *quasistatique*, AB, telle que le volume massique final, en B, soit $v_f = 0{,}01\,\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$.

1. Préciser l'état physique et la composition du fluide dans l'état A et dans l'état B.
2. Calculer le travail mécanique au cours de la transformation AB. On pourra faire une hypothèse simplificatrice.
3. Calculer le transfert thermique reçu par le réfrigérant.

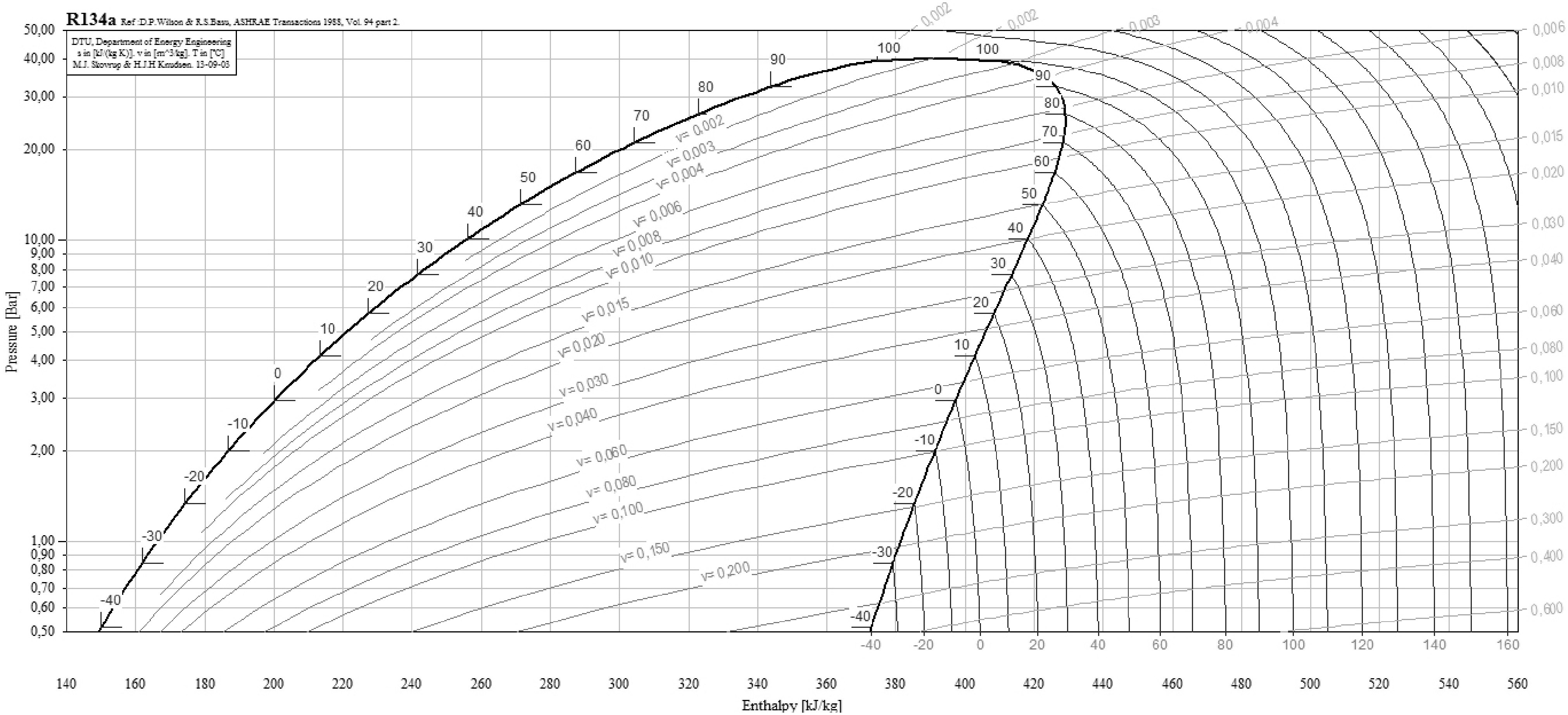


Fig. 1 : Diagramme (P, h) du réfrigérant R 134 a.