TD T1 : **Premier principe de la thermodynamique**

Questions de cours à savoir refaire

Système thermodynamique, variables d'état, équilibre thermodynamique et équations d'état

Vocabulaire de la thermodynamique. Définir un système thermodynamique. Phases, états microscopique et macroscopique de la matière. Variables et fonctions d'état extensives et intensives. Grandeurs molaires et massiques.

Définir les différents équilibres thermodynamiques. Notion d'état stationnaire et d'équilibre thermodynamique local. Équations d'états du gaz parfait (GP) et d'une phase condensée incompressible et indilatable (PCII). Pression partielle d'un gaz.

Transformation thermodynamique et premier principe de la thermodynamique

Définir et connaitre le vocabulaire des transformations thermodynamiques, d'un thermostat et d'un pressostat.

Énoncé du premier principe $\Delta E = W + Q$. Description des différents termes.

Énergie mécanique E et énergie interne U, capacité thermique à volume constant C_V, expression dans le cas d'un GP (1$^{\text{ère}}$ loi de Joule) et d'une PCII. Transfert thermique Q et description phénoménologique. Travail des forces de pression : cas isochore, monobare, isotherme mécaniquement réversible (quasi-statique).

1 Mise en contact entre deux solides

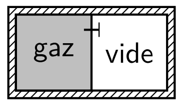
On considère deux solides (PCII), le premier de masse m_1, de capacité thermique massique c_1 à la température T_{1i}, le second de masse m_2 et capacité thermique massique c_2 à T_{2i}. On met en contact ces deux solides et on les isole thermiquement de l'extérieur. À l'équilibre thermique, les deux solides atteigne la même température T_f.

1. En considérant le système total $\Sigma = \{1 + 2\}$ et à l'aide de l'extensivité de l'énergie interne, déterminer l'expression de la variation d'énergie interne totale ΔU .
2. En déduire l'expression de T_f. Que vaut-elle si $m_2 \gg m_1$? Comment peut-on alors définir un thermostat ?
3. En considérant le système $\{1\}$, déterminer l'expression du transfert thermique entre les deux solides.

2 Détente de Joule-Gay Lussac

Un récipient aux parois athermanes est composé de deux parties de volume identique V_0 communiquant par un robinet. Initialement, seul la partie de gauche est occupée par une GP de température T_0, le robinet étant fermé et la partie de droite vide. On ouvre le robinet sans fournir de travail au gaz puis on attend que l'équilibre thermodynamique se fasse.

1. Que dire du travail et du transfert thermique reçus par le gaz lors de la transformation ?
2. À l'aide du 1$^{\text{er}}$ principe, déterminer l'état d'équilibre final.



3 Chauffage de l'eau par une résistance

On considère une masse $m = 1$ kg d'eau de capacité thermique massique $c_{\text{eau}} = 4,18.10^3$ J.K^{-1}.kg^{-1} contenue dans un récipient calorifugé que l'on peut chauffer à l'aide d'une résistance $R = 10\ \Omega$, alimentée par un courant électrique continu $I = 10$ A. On suppose que la puissance thermique reçue par l'eau vaut $\mathcal{P}_{\text{th}} = RI^2$.

À l'aide du premier principe, déterminer la durée Δt nécessaire pour faire passer l'eau de $T_i = 20°\text{C}$ à $T_2 = 100°\text{C}$.

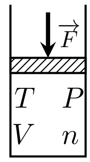
4 Choc thermique isochore ou monobare d'un gaz

On considère n moles de GP de capacité thermique molaire C_{Vm} dans une enceinte rigide, fermée par un piston sans masse, de section S et éventuellement mobile. On note (T_i, P_i, V_i) l'état initial. À l'instant initial, on met le système en contact avec un thermostat à $T_e \neq T_i$ et P_e. Caractériser l'état final puis déterminer la variation d'énergie interne ΔU, le transfert thermique Q et le travail W reçus par le gaz au cours des deux transformations suivantes. Effectuer les applications numériques pour $n = 1$ mol d'air, $T_i = 300$ K et $T_e = 400$ K.

1. Dans une 1$^{\text{ère}}$ expérience, le piston est maintenu fixe.
2. Dans une 2$^{\text{nde}}$ expérience, le piston, initialement à l'équilibre mécanique, est libre de se déplacer.

5 Compression/détente adiabatique ou isotherme

On considère n moles de gaz parfait diatomique dans une enceinte rigide, fermée par un piston vertical sans masse, de section S et mobile sans frottements. Le système est initialement à l'équilibre avec l'extérieur, thermostat à T_e et pressostat à $P_e = 1$ bar. Dans une 1ère expérience, on applique une force F_0 constante sur le piston, suffisante pour qu'il se déplace de façon brusque (par ex. en posant une “grande” masse m_1 sur le piston). On suppose alors que le transfert thermique est nul lors de ce mouvement.



1. Question préliminaire : calculer la température finale d'une compression adiabatique d'une mole de GP diatomique sous l'effet d'un travail $W = 500$ J.
2. En considérant la pression équivalente extérieure constante $P_e + \frac{F}{S}$, montrer que le travail reçu par le gaz s'exprime $W = -nR\,(T_f - T_0) + \dfrac{F_0}{S}V_0$.
3. Appliquer le 1er principe pour déterminer la température T_f atteinte par le gaz.
4. A.N. : seringue de diamètre $d = 1$ cm avec $F_0 = 50$ N.

Dans une 2nde expérience, on applique une force dont l'intensité augmente progressivement jusqu'à atteindre F_0 (par ex. en posant l'une après l'autre des “petites” masses δm sur le piston jusqu'à atteindre m_1). La variation est très lente et on suppose que la transformation est mécaniquement réversible et isotherme.

5. Déterminer le transfert thermique Q et le travail W reçus par le gaz. Comparer à l'expérience précédente.

Compléments au premier principe

Transformation cyclique, diagramme de Watt et calcul du travail. (HP) Premier principe infinitésimal et instantané. Notion de flux thermique et modèle de Newton du transfert conducto-convectif $\phi = hS(T_e - T)$.

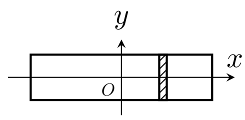
Transformations monobares et fonction d'état enthalpie

Fonction d'état enthalpie et utilisation. Capacité thermique à pression constante. Expression dans le cas du GP (2nde loi de Joule et relation de Mayer) et des PCII.

Exercices

6 Oscillations d'un piston sans frottements (**)

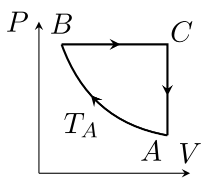
Un tube cylindrique horizontal de section S et de longueur $2L$ est séparé en deux compartiments par un piston de masse m, mobile sans frottement dans le tube. L'épaisseur de ce piston est négligeable par rapport à la longueur du tube. Chaque compartiment ainsi délimité contient la même quantité n d'un gaz parfait, à la température T_0 et sous pression initiale P_0.



La position du piston dans le tube est repérée par son abscisse $x(t)$ mesurée par rapport au milieu du tube. Lorsque le système est à l'équilibre, le piston est donc en $x = 0$. A la date $t = 0$, on écarte le piston d'une distante $x(t = 0) = d$ et on le lâche sans vitesse initiale. Le tube est fixe dans un référentiel d'étude supposé galiléen. On suppose que l'évolution est isotherme à température T_0.

1. Déterminer la pression dans chaque compartiment en fonction de x puis établir l'équation différentielle sur x.
2. On considère le cas de petits déplacements du piston : $x(t) \ll L$. Déterminer la période des oscillations en effectuant une approximation affine.

7 Transformation cyclique (*)



Une mole de gaz parfait monoatomique contenue dans un cylindre décrit de manière quasi-statique et mécaniquement réversible le cycle $A \to B \to C \to A$ décrit ci-contre. $A \to B$ est une compression isotherme à la température $T_A = 300$ K. En A, $P_A = 1{,}0$ bar. $B \to C$ est un échauffement isobare à la pression $P_B = 5{,}0$ bar. $C \to A$ est un refroidissement isochore.

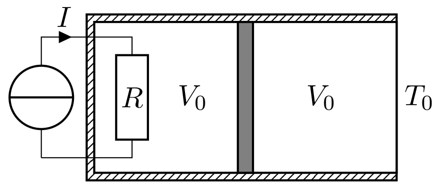
1. Calculer les volumes V_A , V_B et V_C ainsi que la température T_C.
2. Calculer le travail et le transfert thermique reçus par le gaz au cours de chacune des évolutions $A \to B$, $B \to C$ et $C \to A$. Calculer leur somme et commenter.

8 Transformation polytropique d'un gaz (**)

On appelle transformation polytropique d'indice $k \in \mathbb{R}^+$ une transformation quasi-statique (donc mécaniquement réversible) au cours de laquelle $PV^k =$ cte.

1. Le gaz étant supposé parfait de coefficient $\gamma = \frac{C_{Pm}}{C_{Vm}}$, exprimer le travail W reçu par le gaz lors d'une transformation de l'état initial (P_1, V_1, n) à l'état final (P_2, V_2, n).
2. Que vaut la variation de l'énergie interne ΔU pour la transformation précédente ? En déduire l'expression du transfert thermique Q au cours de la transformation précédente et le mettre sous la forme $Q = C(T_2 - T_1)$. À quelle grandeur thermodynamique est homogène cette constante C ?
3. Étudier le sens physique des cas $k = \gamma$, $k = 1$, $k = 0$ et $k \to \infty$.

9 Chauffage par une résistance (***)



Un récipient de volume total fixe $2V_0$ ($V_0 = 10$ L) est divisé en deux compartiments par un piston mobile (de surface S) sans frottement et sans masse. Les parois du compartiment de droite permettent les transferts thermiques, alors que celles du compartiment de gauche ainsi que le piston sont calorifugées.

Initialement, l'air (gaz parfait de rapport $\gamma = 1,4$) contenu dans chacun des deux compartiments est à la température $T_0 = 300$ K et à la pression $P_0 = 10^5$ Pa, l'air extérieur au récipient étant à T_0. À l'intérieur du compartiment de gauche se trouve une résistance $r = 10\Omega$. Cette résistance est parcourue par un courant continu $I = 1,0$ A. On arrête le courant après une durée τ dès que la pression dans le compartiment de gauche vaut $P_1 = 2P_0$. Les transformations sont supposées quasi-statiques.

1. Déterminer les valeurs (P_2, T_2, V_2) dans le compartiment de droite à la fin de l'expérience.
2. Quelle est la température finale T_1 dans le compartiment de gauche ?
3. Quelle hypothèse peut-on faire sur la transformation subie par le gaz du compartiment de droite ?
4. Quel travail des forces de pression W_2 a été reçu par le compartiment de droite ? Et celui W_1 reçu par le compartiment de gauche ?
5. Que vaut le transfert thermique Q_2 échangé entre le compartiment de droite et le thermostat extérieur ?
6. Quel est le travail électrique W_{elec} fourni par la résistance ? En déduire la durée τ du chauffage ?

10 Étude d'une combustion isochore (**)

Dans le cylindre d'un moteur automobile de volume constant $V = 0,500$ L, un mélange d'air (20% de dioxygène et 80% de diazote, de masse molaire moléculaire moyenne $M_1 = 29$ g.mol^{-1}) et d'essence (octane C_8H_{18} de masse molaire $M_2 = 114$ g.mol^{-1}) brûle selon la réaction de combustion $C_8H_{18} + \frac{25}{2}O_2 = 8CO_2 + 9H_2O$. On assimile tous les corps à des gaz parfaits diatomiques. On introduit dans le piston une masse $m = 57$ mg d'essence et un volume d'air apportant exactement la quantité de dioxygène nécessaire à la combustion de l'essence. La température initiale du mélange est $T_1 = 300$ K. Le pouvoir calorifique de l'octane (énergie dégagée sous forme de transfert thermique par la réaction de combustion d'une mole) est $Q_m = 5,1.10^6$ J.mol^{-1}.

1. Faire l'inventaire des quantités de matière des différentes espèces avant et après réaction chimique. En déduire la pression initiale du mélange combustible.
2. Calculer le transfert thermique reçu par le gaz du fait de la combustion de l'octane et en déduire la température et la pression finale du gaz restant.

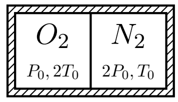
11 Refroidissement d'un métal (*)

On considère un échantillon cubique de cuivre de masse $m = 100$ g, de masse volumique $\mu = 9,0$ g.cm^{-3}, de capacité thermique massique $c = 380$ J.kg^{-1}.K^{-1} et de température initiale $T_1 = 1000$°C. On place cet échantillon dans l'air de température $T_0 = 20$°C. L'échange thermique entre le métal et l'air vérifie la loi de Newton avec un coefficient de convection $h = 10$ W.m^{-2}.K^{-1} : $\Phi(t) = hS(T_0 - T(t))$. On supposera que la température $T(t)$ est à chaque instant homogène dans l'échantillon.

1. Déterminer la valeur du côté a du cube et en déduire la surface d'échange extérieur S.
2. À l'aide du premier principe instantané, établir puis résoudre l'équation différentielle vérifiée par la température T du métal. On introduira un temps caractéristique τ s'exprimant en fonction de h, S, m et c.
3. En déduire la durée Δt nécessaire à la thermalisation de l'échantillon.

12 Mélange de deux gaz (**)

Un récipient globalement calorifugé et indéformable est initialement séparé en deux parties de même volume V_0. Le premier compartiment contient du dioxygène à la pression P_0 et la température $2T_0$. Le second contient du diazote à la pression $2P_0$ et la température T_0. On ouvre alors un robinet entre les deux compartiments. Les deux gaz sont supposés parfaits diatomiques.



1. Déterminer la relation entre n_1 et n_2 puis décrire l'état final et exprimer, à l'aide du premier principe, la température finale en fonction de T_0.
2. Quelle est la variation d'énergie interne de chacun des deux gaz ?

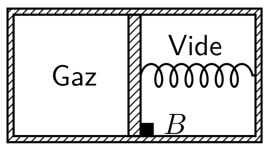
13 Évolution temporelle de la température (**)

On considère un bain thermostaté, constitué d'une cuve remplie d'eau (système de capacité thermique C constante) et d'un dispositif de chauffage qui fournit à l'eau une puissance réglable $\mathcal{P}$. La température de l'atmosphère est constante, égale à T_0. La température T de l'eau est supposée homogène. Dans ces conditions, le flux thermique reçu par l'eau peut s'écrire $\phi = \lambda(T_0 - T)$, où λ est une constante positive. À l'instant $t = 0$, le système est à T_0 , et on allume le dispositif de chauffage qui délivre une puissance $\mathcal{P}_0$ constante.

1. Déterminer l'équation différentielle vérifiée par T.
2. Établir l'existence d'une constante de temps τ et d'une température limite T_∞.
3. AN : $C = 4$ kJ.K^{-1}, $T_0 = 290$ K, $T_\infty = 340$ K et $\tau = 10^3$ s. Calculer λ et $\mathcal{P}_0$.

14 Piston et ressort (***)

On considère un piston calorifugé mobile dans un cylindre calorifugé horizontal de section constante $S =$ 500 cm^2. Le compartiment de gauche contient $n =$ 0,01 mol d'un gaz parfait de capacité thermique molaire $C_{Vm} = \frac{5}{2}R$ et le compartiment de droite est soumis à un vide poussé. Le piston est relié à la paroi de droite par un ressort de raideur $k = 10^4$ N.m^{-1}. Initialement, le piston est coincé par une butée B, le ressort n'est pas tendu, la pression du gaz vaut $P_0 = 0,241$ bar et sa température $T_0 = 290$ K.



1. Calculer le volume V_0 occupé initialement par le gaz.

On supprime la butée B. Le système évolue vers un nouvel état d'équilibre final dont on souhaite déterminer l'allongement x_f du ressort, le volume V_f, la pression P_f, la température T_f et le travail W reçu.

2. En appliquant le P.F.D. au piston au repos dans l'état final, donner le relation entre P_f , S, k et x_f.
3. Appliquer le 1$^{\text{er}}$ principe au GP (en fait {GP+piston}) et en déduire une relation entre T_f , T_0 , n, R, k et x_f.
4. Quelle est la relation liant le volume final V_f avec V_0 , x_f et S ?
5. En déduire que la pression P_f est solution de l'équation : $P_f^2 + \dfrac{5}{6}\dfrac{kV_0}{S^2}P_f - \dfrac{5}{6}\dfrac{k}{S^2}nRT_0 = 0$
6. En déduire les valeurs des grandeurs recherchées.