

TD d'application : Systèmes thermodynamiques



I Pression des pneus

La pression préconisée sur les roues avant d'une Mégane est de 2,2 bar. On règle la pression des pneus un jour froid de cet hiver, par une température extérieure de -5°C .

- 1 En supposant que le volume des pneus ne varie pas et qu'il n'y a aucune fuite d'air possible, quelle sera l'indication du manomètre un jour chaud cet été, par une température extérieure de 30°C ?
- 2 Calculer la variation relative de pression due au changement de température. Que conseillez-vous ?



II Fuite d'hélium

On considère une bouteille de volume constant $V = 10\text{ L}$ contenant de l'hélium, modélisé comme un gaz parfait monoatomique, à la pression $P = 2,1\text{ bar}$ et à la température $T = 300\text{ K}$. On donne $M(\text{He}) = 4,0\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ et $k_B = 1,38 \times 10^{-23}\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$.

- 1 Calculer la masse m d'hélium dans la bouteille, puis la densité particulaire n^* , c'est-à-dire le nombre d'atomes par unité de volume.
- 2 Calculer la vitesse quadratique moyenne des atomes.
- 3 À la suite de l'ouverture de la bouteille, la pression passe à $P' = 1,4\text{ bar}$ et la température à $T' = 290\text{ K}$. Calculer la masse Δm de gaz qui s'est échappé de la bouteille.
- 4 On a vite refermé la bouteille. À quelle température T'' faudrait-il porter le gaz pour atteindre à nouveau la pression P ? L'exprimer en fonction de P , P' et T' .



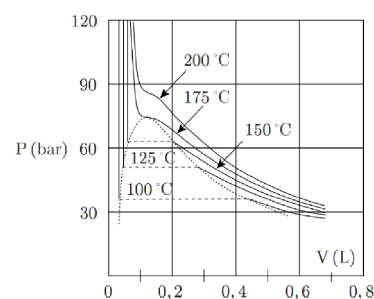
III Gaz parfait dans une enceinte

- 1 Comment évolue la vitesse quadratique d'agitation dans un gaz si on multiplie sa température absolue par 2 ?
- 2 Comparer la vitesse quadratique moyenne d'agitation thermique des atomes dans un gaz d'hélium $M(\text{He}) = 4\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ et un échantillon de gaz de dioxygène $M(\text{O}_2) = 32\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ à la même température.
- 3 Retrouver l'expression de l'énergie interne d'une mole de gaz parfait d'hélium.
- 4 En déduire l'expression de sa capacité thermique à volume constant.



IV Isothermes d'ANDREWS

La figure ci-contre représente un ensemble de courbes expérimentales appelées isothermes d'ANDREWS, représentant la pression P d'une mole de fluide en fonction du volume, pour différentes températures.



- 1 Déterminer les coordonnées (P_C, V_C) du point critique et préciser quelle courbe est la courbe de rosée et laquelle est la courbe d'ébullition.

- 3 Préciser l'état physique et calculer, s'ils sont définis, les titres massiques x_g et x_ℓ de la vapeur et du liquide pour :

a – $V_m = 0,6 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ et $T = 110^\circ\text{C}$;

b – $P = 110 \text{ bars}$ et $T = 200^\circ\text{C}$;

c – $V_m = 0,2 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ et $T = 125^\circ\text{C}$.

- 4 Que vaut le volume molaire de la vapeur saturante à la pression de 40 bars ?



V Stockage d'eau chaude

Une masse $m = 100 \text{ kg}$ d'eau chaude est stockée dans une cuve fermée de volume $V_0 = 200 \text{ L}$, que l'on modélise comme étant indéformable. Pour simplifier, on ne tient pas compte de l'air contenu dans la cuve en plus de l'eau. Suite à un échauffement accidentel, l'eau normalement maintenue à $T_0 = 60^\circ\text{C}$ passe à $T = 500^\circ\text{C}$.

La vapeur d'eau est modélisée par un gaz parfait. On tient compte de la légère compressibilité et dilatabilité de l'eau liquide par une équation d'état de la forme :

$$\ln \frac{V}{V_0} = \alpha(T - T_0) - \chi_T(P - P_0) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \alpha = 3,0 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1} \\ \chi_T = 5,0 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1} \end{cases}$$

On donne le diagramme de CLAPEYRON (P, v) de l'eau Figure T1.1. Plusieurs isothermes sont représentées pour des températures allant de 60 à 600°C. Attention, les échelles sont logarithmiques.

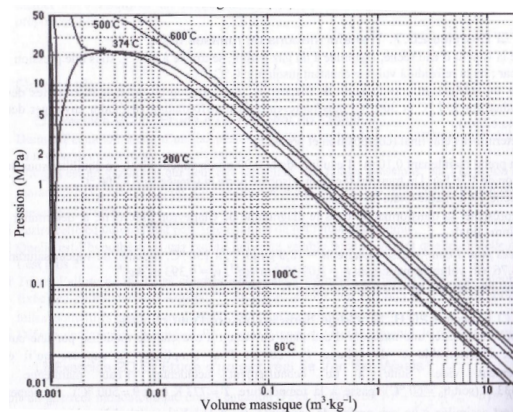


FIGURE T1.1

- Identifiez, sur le diagramme de CLAPEYRON, la courbe de rosée, la courbe d'ébullition, le point critique et les différentes phases dans lesquelles se trouve l'eau.
- Montrez que pour un équilibre liquide-vapeur, on a $x_g = \frac{m_g}{m_g + m_\ell} = \frac{v - v_\ell}{v_g - v_\ell}$ où m_g représente la masse d'eau sous la forme vapeur, m_ℓ , la masse d'eau sous forme de liquide, v , le volume massique du mélange, v_g et v_ℓ , les volumes massiques des phases vapeur et liquide.
- En utilisant le diagramme de CLAPEYRON, déterminer la composition du mélange liquide-gaz initial.
- Sous quelle forme trouve-t-on l'eau après l'échauffement accidentel ? Déterminer la pression P correspondante. Commenter.
- La soupape de sécurité permet au fur et à mesure du chauffage de laisser de la vapeur d'eau s'échapper : la cuve est finalement presque vide et ne contient plus que $m_0 = 400 \text{ g}$ d'eau. Déterminer la pression finale et conclure.



VI Recherche d'équilibre diphasé

Dans une enceinte totalement isolée de l'extérieur, initialement vide et de volume $V = 1,0 \text{ L}$, on introduit une goutte d'eau de $m = 1,0 \text{ g}$ de température $T = 300 \text{ K}$. Tous les gaz seront considérés parfaits.

À la température T , la pression de vapeur saturante de l'eau est $P_{\text{sat}}(300 \text{ K}) = 4240 \text{ Pa}$. On donne également $M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ et $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

- Supposons tout d'abord que la goutte ait été totalement vaporisée : donner la valeur de la pression obtenue dans l'enceinte et conclure.
- Supposons à présent que la goutte n'ait que partiellement été vaporisée. Que vaut la pression dans l'enceinte ? En déduire le titre massique en vapeur.

On reprend l'expérience dans de nouvelles conditions. On insère $m = 1,0 \text{ g}$ d'eau à la température $T_0 = 100^\circ\text{C}$ dans un récipient de volume variable, contrôlé par un piston, de volume initial $V_0 = 3,0 \text{ L}$. À T_0 , $P_{\text{sat}}(T_0) = 1,0 \text{ bar}$. On comprime le système sans changement de température jusqu'au volume final $V_1 = 1,0 \text{ L}$. On donne :

$$R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \quad \text{et} \quad M_{\text{eau}} = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

- Préciser la composition du système dans l'état initial.
- Préciser la composition du système dans l'état final.

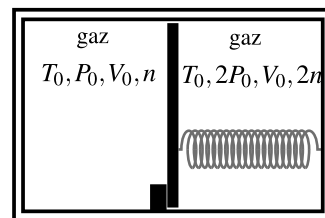
TD d'entraînement : Systèmes thermodynamiques



I Recherche d'un état final

Une enceinte indéformable aux parois calorifugées ^a est séparée en deux compartiments par une cloison étanche de surface S , mobile, diathermane ^b et reliée à un ressort de constante de raideur k . Les deux compartiments contiennent chacun un gaz parfait. Dans l'état initial, le gaz du compartiment 1 est dans l'état (T_0, V_0, P_0, n) , le gaz du compartiment 2 dans l'état $(T_0, V_0, 2P_0, 2n)$, une cale bloque la cloison mobile et la longueur du ressort est égale à sa longueur à vide. On enlève la cale et on laisse le système atteindre un état d'équilibre.

- ^a. Qui ne laisse pas passer la chaleur.
^b. Qui laisse passer la chaleur.



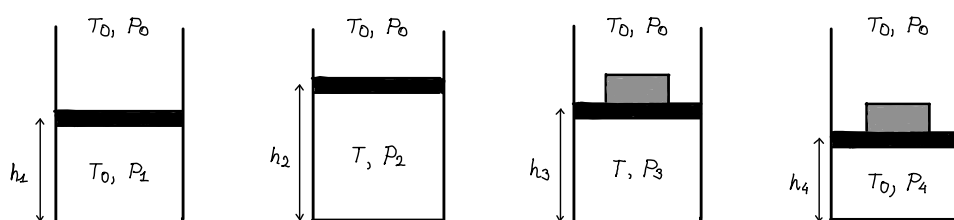
- 1 Décrire qualitativement l'évolution du système.
- 2 Écrire cinq relations faisant intervenir certaines des six variables d'état : V_1 et V_2 les volumes finaux de chaque compartiment, P_1 et P_2 leurs pressions, et T_1 et T_2 leurs températures.



II Gaz parfait dans une enceinte

Une quantité de matière n de gaz parfait est enfermée dans une enceinte de surface de section S . Cette enceinte est fermée par un piston de masse m , à même de coulisser sans frottement, et permet les transferts thermiques, si bien que lorsqu'on attend suffisamment longtemps le gaz contenu dans l'enceinte est en équilibre thermique avec l'extérieur. Le milieu extérieur se trouve à température et pression constantes T_0 et P_0 . On fait subir au gaz la série de transformations suivante :

- ① Dans l'état (1), le système est au repos et a atteint l'équilibre thermique et mécanique ;
- ② État (2) : le gaz est chauffé jusqu'à ce qu'il atteigne la température $T > T_0$, on est à l'équilibre dynamique ;
- ③ État (3) : on place brusquement une masse supplémentaire M sur le piston, l'équilibre thermique n'est pas atteint ;
- ④ État (4) : l'équilibre thermique est atteint.



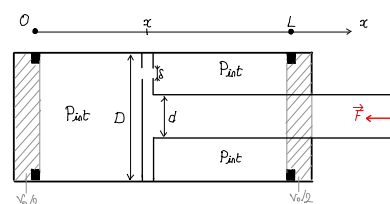
- 1 Exprimer les hauteurs h_1 à h_4 du piston dans chaque état, en fonction des grandeurs d'état d'abord, puis en fonction de h_1 ensuite.



III Ressort à gaz

Les sièges de bureaux sont souvent montés sur un vérin cylindrique permettant d'en ajuster la hauteur. On décrit ce vérin cylindrique à air comprimé, supposé parfait, par le schéma ci-contre.

Le piston a une épaisseur nulle, et on pourra négliger la section de l'orifice de communication de diamètre δ devant les autres sections. On note V_0 l'ensemble des deux volumes morts que le piston ne peut atteindre, situés en $x < 0$ et $x > L$. On prendra également $D = 2d$. On supposera que l'équilibre thermique du gaz avec l'air extérieur de température T_0 est réalisé pour toute position du piston, et on note P_0 la pression extérieure.



- 1 Exprimer le volume $V(x)$ disponible pour le gaz dans le vérin en fonction de L , x et d .
- 2 Donnez l'expression de $p_{\text{int}}(x)$ en fonction de $V(x)$.
- 3 On suppose le système à l'équilibre mécanique avec le piston à la position x . Une personne s'assoie sur le siège, exerçant une force $\vec{F}$. Exprimer la force $\vec{F}'$ qu'exerce la tige sur le système extérieur.



IV Évaporation d'un verre d'eau



Hygrométrie

Le degré hygrométrique H d'une atmosphère est défini comme le rapport de la pression partielle en vapeur d'eau $P_{\text{H}_2\text{O}}$ sur la pression de vapeur saturante P_{sat} à une température donnée : $H = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{sat}}}$. On le donne généralement sous la forme d'un pourcentage.

On considère une pièce hermétiquement fermée, de volume $V = 40 \text{ m}^3$, dans laquelle on place un récipient contenant 200 mL d'eau liquide. L'air de la pièce est à la pression $P_0 = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ et à la température $T_0 = 293 \text{ K}$. Son degré d'hygrométrie est $H_0 = 60\%$. On donne $P_{\text{sat}}(293) = 2,3 \text{ kPa}$. On assimile l'eau à un gaz parfait de masse molaire $M = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

- 1 Calculez la quantité de matière en eau initialement présente dans l'air de la pièce.
- 2 Montrez que toute l'eau contenu dans le récipient va s'évaporer.
- 3 Quel volume d'eau liquide faut-il évaporer pour saturer la pièce en eau (degré hygrométrique de 100%) ? Que se passe-t-il si le récipient contient un volume d'eau supérieur à cette valeur ?



V Vapeur sèche ou vapeur saturante ?

Un cylindre indéformable fermé par un piston **contient de l'air sec** sous la pression $P_1 = 1 \text{ bar}$, avec un volume initial $V_1 = 1,5 \text{ L}$ et une température maintenue à $\theta_1 = 50^\circ\text{C}$. On y **introduit une masse m d'eau** à la même température à volume constant. La pression devient alors $P_2 = 1,10 \text{ bar}$. On donne $M_{\text{eau}} = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, et on considère que la vapeur d'eau sèche se comporte comme un gaz parfait.

$T \text{ }^\circ\text{C}$	30	50	60	100
$P_{\text{sat}} \text{ bar}$	0,04	0,12	0,20	1,00

- 1 Montrer que l'eau introduite se retrouve à l'état de vapeur sèche et calculer la masse m introduite.
- 2 La température étant maintenue constante, un opératoire déplace le piston de façon réversible pour amener le volume à $V_3 = 1 \text{ L}$. Montrer que la vapeur d'eau devient saturante à partir d'un volume V' . Déterminer ce volume et la pression totale finale P_3 .
- 3 Le piston étant maintenant maintenu dans sa position finale, un thermostat permet d'élever progressivement la température à $T_4 = 100^\circ\text{C}$. En déduire l'état et la nouvelle pression totale finale P_4 .