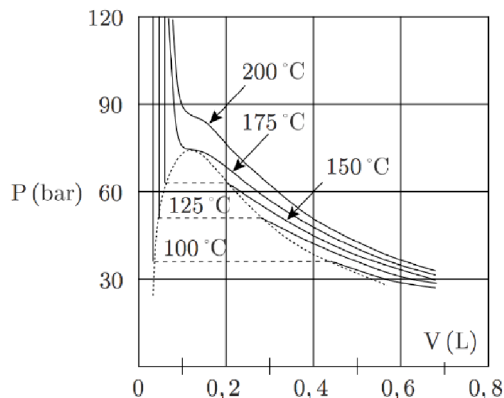


TD d'application : Changements d'états



I 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 **molaire**, pour différentes températures.



- Déterminer les coordonnées (P_C, V_C) du point critique.
- Indiquer la courbe de rosée et la courbe d'ébullition.
- 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 :
 - $V_m = 0,6 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ et $T = 110^\circ \text{C}$;
 - $P = 110 \text{ bars}$ et $T = 200^\circ \text{C}$;
 - $V_m = 0,2 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ et $T = 125^\circ \text{C}$.
- Que vaut le volume molaire de la vapeur saturante à la pression de 40 bars ?



II 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 :

$$\ln \frac{V}{V_0} = \alpha(T - T_0) - \chi_T(P - P_0)$$

avec

$$\begin{cases} \alpha = 3,0 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1} \\ \chi_T = 5,0 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1} \end{cases}$$

On donne le diagramme de CLAPEYRON (P, v) de l'eau Figure T6.1. Plusieurs isothermes sont représentées pour des températures allant de 60 à 600 °C. Attention, les échelles sont logarithmiques.

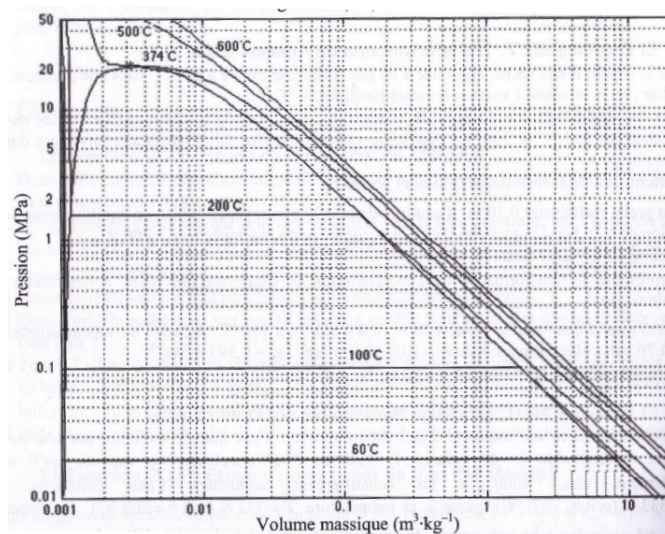


FIGURE T6.1

- 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 :

$$x_g = \frac{m_g}{m_g + m_l} = \frac{v - v_l}{v_g - v_l}$$

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.



III 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 $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

- 1) Supposons tout d'abord que la goutte ait été totalement vaporisée : donner la valeur de la pression obtenue dans l'enceinte et conclure.
- 2) 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.



IV Calorimétries

Dans un calorimètre parfaitement isolé de capacité thermique C , on place $m = 100 \text{ g}$ d'eau à la température $\theta = 18^\circ\text{C}$ en équilibre thermique avec le vase intérieur et une masse m_g de glace sèche à $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$.

- 1) Calculer la température d'équilibre pour $C = 150 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ et $m_g = 25 \text{ g}$.
- 2) Calculer la température d'équilibre pour $C = 246 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ et $m_g = 50 \text{ g}$. Quelle proportion de glace a fondu ?



Données

$c_{\text{eau}} = 4185 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $\Delta h_{\text{fus}} = 335 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.



V Résolution de problème : rafraîchir un soda

- 1) Par une chaude journée d'été, vous avez oublié de mettre votre soda au frais. Combien de glaçons faut-il ajouter pour que sa température descende à 5°C ?

Il faudra pour cela faire quelques hypothèses sur les différentes capacités thermiques, en vous inspirant des capacités typiques données dans d'autres exercices du type calorimétrie, ainsi que sur la masse d'un glaçon. On donne $d_{\text{glace}} = 0,9$ la densité d'un glaçon.

TD d'entraînement : Changements d'états



I Cycle moteur de RANKINE

Un moteur fonctionne avec une masse m d'eau. Cette masse d'eau subit les transformations suivantes :

- ◇ AB : isotherme (A liquide saturant à T_1 et P_1 ; B à P_2) ;
- ◇ BC : échauffement réversible isobare qui amène l'eau à la température T_2 (C liquide saturant) ;
- ◇ CD : vaporisation totale sous la pression P_2 et à la température T_2 ;
- ◇ DE : détente adiabatique réversible jusqu'à la température T_1 ;
- ◇ EA : liquéfaction totale à la température T_1 .

La capacité thermique massique de l'eau liquide vaut $c_{\text{liq}} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Dans le tableau suivant, on donne les caractéristiques des points se trouvant sur la courbe de saturation aux pressions P_1 et P_2 .

	P (bar)	T (K)	v_ℓ ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	v_g ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	h_ℓ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	h_g ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
P_1	0,250	338,15	$1,02 \times 10^{-3}$	6,202	272,02	2618,4
P_2	1,208	378,15	$1,05 \times 10^{-3}$	1,419	440,17	2683,7

La variation d'entropie massique d'un liquide pour une transformation d'une température T_A à une température T_B s'exprime

$$\Delta s_{AB} = s_B - s_A = c_{\text{liq}} \ln \left(\frac{T_B}{T_A} \right)$$

La variation d'entropie massique lors d'un changement d'état est :

$$\Delta s = \frac{\Delta h}{T}$$

avec Δh la variation d'enthalpie massique lors du changement d'état et T la température du changement d'état.

- 1) Tracer l'allure de deux isothermes d'ANDREWS dans le diagramme de CLAPEYRON. On fera apparaître la courbe de saturation. Dessiner l'allure du cycle sur ce même diagramme.
- 2) a – Montrer que la variation $s_B - s_A$ est nulle.
 b – Exprimer $s_C - s_B$ en fonction de c_{liq} , T_1 et T_2 .
 c – Exprimer $s_D - s_C$ en fonction de $h_g(T_2)$, $h_\ell(T_2)$ et T_2 .
 d – Calculer $s_E - s_D$.
- 3) Énoncer le théorème des moments.
- 4) Soit x la fraction massique de vapeur en E. On admet que l'on peut appliquer le théorème des moments pour l'entropie. Déterminer x littéralement puis numériquement.
- 5) Calculer les transferts thermiques massiques échangés lors des transformations BCD et EA.
- 6) Déterminer le rendement du cycle. Application numérique.

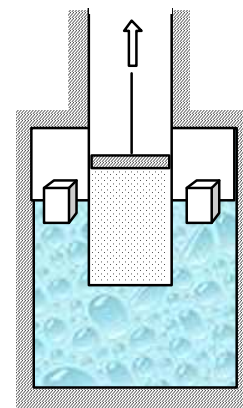


II Fabrication de glace

Un cylindre aux parois diathermanes enferme $n = 1$ mol d'air, considéré comme un gaz parfait, à la température $T_0 = 273$ K. Le corps du cylindre est en contact thermique avec de l'eau liquide en équilibre avec de la glace, également à la température initiale de $T_0 = 273$ K sous la pression atmosphérique normale.

On détend le piston enfermant l'air de manière réversible, de la pression $P_1 = 7$ bar à la pression $P_2 = 3$ bar.

On donne la chaleur latente de fusion de la glace : $\ell_{\text{fus}}(T_0) = 334 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.



- 1) Comment qualifier la transformation de l'air ? À l'aide du premier principe, en déduire le transfert thermique Q_{air} reçu par l'air lors de la détente.
- 2) Caractériser la transformation subie par le mélange eau-glace à l'extérieur du cylindre. En déduire la valeur de la chaleur échangée Q_{eau} , puis la masse de glace m_g obtenue lors de cette opération.
- 3) Quelle est la variation d'entropie de chaque système ? Du système entier ? Que vaut l'entropie totale créée ? Commenter la cohérence.



III Glaçon et vapeur d'eau

On considère une enceinte calorifugée et maintenue à pression constante $P_0 = 1,0$ bar. On y introduit une masse m d'eau sous deux phases : une masse $(1 - \alpha)m$ de vapeur d'eau à $T_{\text{eb}} = 373$ K, ainsi qu'un glaçon de masse αm dont la température initiale $T_{\text{fus}} = 273$ K.

- 1) Expliquer qualitativement ce qui va se passer dans l'enceinte.
- 2) On suppose pour commencer que la température finale est égale à T_{fus} . On appelle alors x la fraction massique de solide. **Faire un schéma détaillé** en proposant un découpage en 4 étapes de transformations menant à l'état final. Exprimer x dans l'état final, et montrer qu'un tel état final n'est possible que si α est supérieur à une valeur minimale α_0 à préciser.
- 3) Déterminer la composition du système dans l'état final lorsque la température finale est égale cette fois à T_{eb} . On fera un schéma détaillé des transformations. Montrer qu'un tel état final n'est possible que si α est inférieur à une valeur maximale α_1 à préciser.
- 4) Déterminer l'expression de la température finale T du système dans l'état final lorsque $\alpha_1 < \alpha < \alpha_0$. On fera un schéma détaillé des transformations. Application numérique pour $\alpha = 0,8$, conclusion.

Données

- ◇ Enthalpie de vaporisation $\ell_{\text{vap}} = 2,3 \times 10^6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$;
- ◇ Enthalpie de fusion $\ell_{\text{fus}} = 330 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;
- ◇ Capacité thermique massique de l'eau liquide $c = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$.