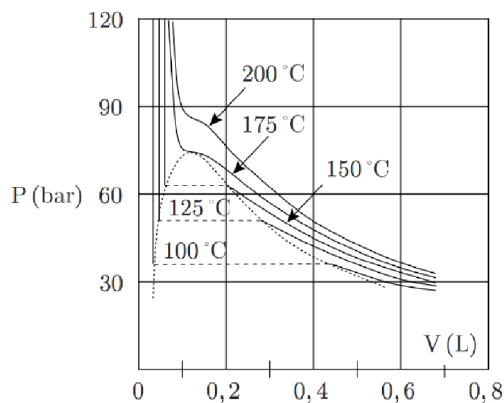


Correction du TD

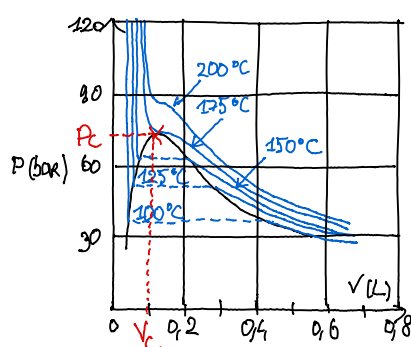
I Isothermes d'ANDREWS

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.



- 1) Déterminer les coordonnées (P_C, V_C) du point critique.

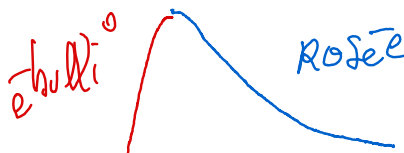
Réponse



On lit $V_C = 0,1 \text{ L}$ et $P_C = 70 \text{ bar}$.

- 2) Indiquer la courbe de rosée et la courbe d'ébullition.

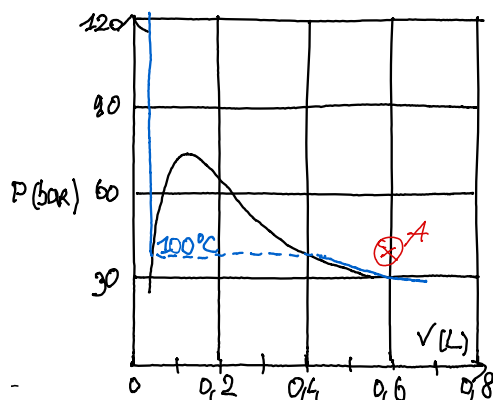
Réponse



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

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

Réponse



Ici, on est dans l'état gazeux car $T_A < T_{\text{critique}}$, soit $x_g = 0$ et $x_L = 0$.

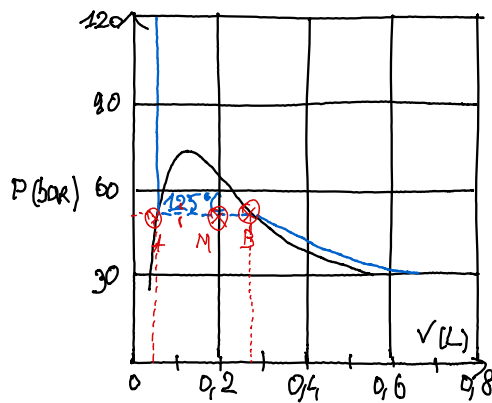
b – $P = 110 \text{ bars}$ et $T = 200^\circ \text{C}$;

Réponse

Dans ce cas, $T_B > T_{\text{critique}}$: x_g et x_L ne sont pas définis : on est dans l'état du fluide supercritique.

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

Réponse



On est dans la zone diphasée. D'après le théorème des moments,

$$x_g = \frac{AM}{AB} = \frac{v - v_l}{v_g - v_l} = \frac{V_m - V_{m,l}}{V_{m,g} - V_{m,l}}$$

$$\text{avec } \begin{cases} V_g = 0,28 \text{ L} \\ V_l = 0,05 \text{ L} \\ V = 0,2 \text{ L} \end{cases}$$

$$\text{A.N. : } x_g = 0,65 \quad \text{et} \quad x_l = 0,35$$

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

Réponse

Pour lire le volume (molaire) de la vapeur saturante à 40 bars, on se reporte sur la courbe de rosée, et on lit $V_m \approx 0,4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$.

II Calorimétries

Données

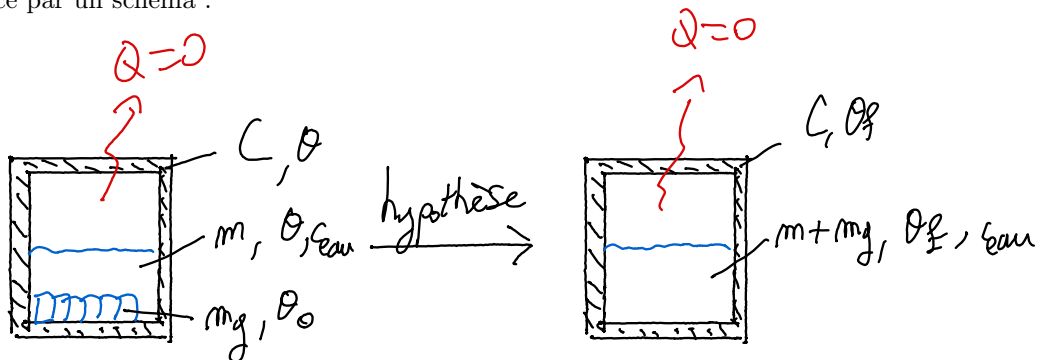
$$c_{\text{eau}} = 4185 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \quad \text{et} \quad \Delta h_{\text{fus}} = 335 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

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 $m_g = 25 \text{ g}$.

Réponse

On commence par un schéma :



Hypothèse : on suppose que toute la glace a fondu. Dans ce cas, comme la transformation est isobare et que le calorimètre est calorifugé, on a

$$\Delta H_{\text{tot}} = Q = 0$$

$$\Leftrightarrow 0 = \Delta H_{\text{calo}} + \Delta H_{\text{eau}} + \Delta H_{\text{glace}}$$

Or,

$$\Delta H_{\text{calo}} = C(T_f - T)$$

$$\Delta H_{\text{eau}} = mc_{\text{eau}}(T_f - T_0)$$

$$\Delta H_{\text{glace}} = m_g c_{\text{eau}}(T_f - T_0) + m_g \Delta h_{\text{fus}}$$

$$\Leftrightarrow (C + mc_{\text{eau}} + m_g c_{\text{eau}})T_f = (C + mc_{\text{eau}})T + m_g c_{\text{eau}}(T_f - T_0) + m_g \Delta h_{\text{fus}}$$

$$\Leftrightarrow T_f = \frac{(C + mc_{\text{eau}})T + m_g c_{\text{eau}}(T_f - T_0) - m_g \Delta h_{\text{fus}}}{C + mc_{\text{eau}} + m_g c_{\text{eau}}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \theta = 18^\circ\text{C} \\ \theta_0 = 0^\circ\text{C} \\ C = 150 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} \\ m = 100 \times 10^{-3} \text{ kg} \\ m_g = 25 \times 10^{-3} \text{ kg} \\ c_{\text{eau}} = 4,185 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1} \\ \Delta h_{\text{fus}} = 335 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1} \end{cases}$$

A.N. : $\theta_f = 2,76^\circ\text{C}$

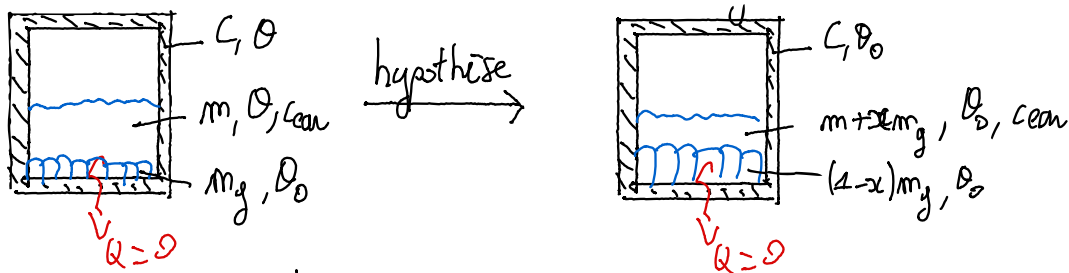
Ce qui est cohérent avec l'hypothèse.



- 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 ?

Réponse

Même expérience mais C et m_g changent. En appliquant la même formule, on obtient $\theta_f = -5,5^\circ\text{C}$! C'est incohérent avec l'hypothèse. On la reformule, en supposant un **équilibre diphasé glace/eau**. La température doit alors être $T_f = T_0$. On appelle x la fraction d'eau qui a gelé. Nouveau schéma :



Dans ce cas, l'eau et le calorimètre refroidissent jusqu'à 0°C , et une fraction x de la glace fond. Ainsi,

$$\Delta H_{\text{calo}} = C(T_f - T)$$

$$\Delta H_{\text{eau}} = mc_{\text{eau}}(T_0 - T)$$

$$\Delta H_{\text{glace}} = xm_g \Delta h_{\text{fus}}$$

Avec $\Delta H_{\text{tot}} = 0$,

$$0 = (C + mc_{\text{eau}})(T_0 - T) + xm_g \Delta h_{\text{fus}}$$

$$\Leftrightarrow x = \frac{(C + mc_{\text{eau}})(T - T_0)}{m_g \Delta h_{\text{fus}}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} C = 245 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} \\ m_g = 50 \times 10^{-3} \text{ kg} \end{cases}$$

A.N. : $x = 0,71$

Autrement dit, **71% de la glace a fondu**.



III 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 6.1. Plusieurs isothermes sont représentées pour des températures allant de 60 à 600°C . Attention, les échelles sont logarithmiques.

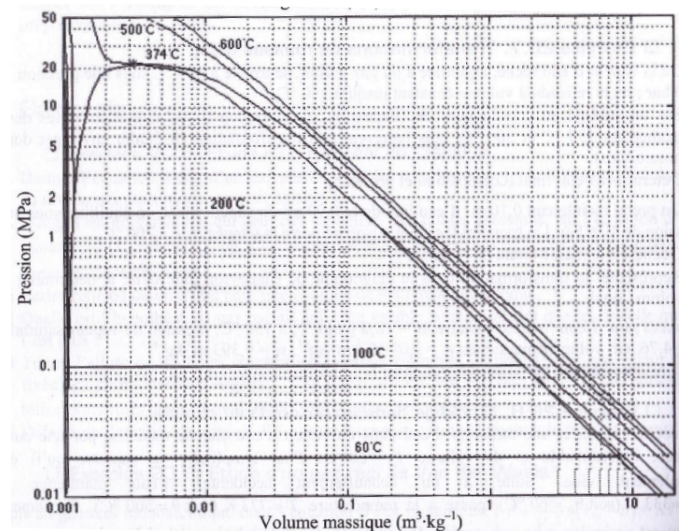
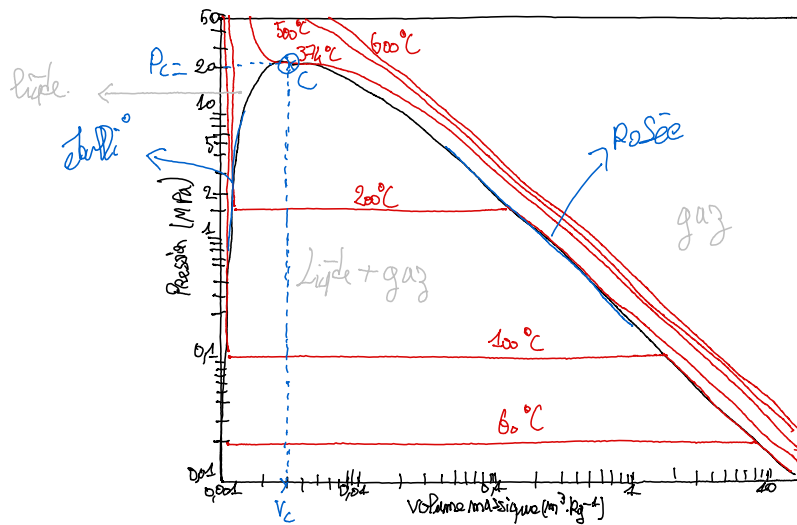


FIGURE 6.1

- 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.

Réponse



- 2) 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.

Réponse

Soit V_g et V_ℓ les volumes de gaz et de liquide, et $V = V_g + V_\ell$ le volume total.

$$\begin{aligned} v &= \frac{V_g}{m} + \frac{V_\ell}{m} \\ \Leftrightarrow v &= \frac{m_g v_g}{m} + \frac{m_\ell v_\ell}{m} & \left. \begin{aligned} v &= V/m \Leftrightarrow V = mv \\ x_g &= m_g/m \\ x_g &= 1 - x_\ell \end{aligned} \right\} \\ \Leftrightarrow v &= x_g v_g + x_\ell v_\ell \\ \Leftrightarrow v &= (1 - x_\ell) v_g + x_\ell v_\ell \\ \Leftrightarrow x_\ell &= \frac{v_g - v}{v_g - v_\ell} \quad \text{et} \quad x_g = \frac{v - v_\ell}{v_g - v_\ell} \end{aligned}$$

- 3) En utilisant le diagramme de CLAPEYRON, déterminer la composition du mélange liquide-gaz initial.

Réponse

On a $v_0 = \frac{V_0}{m}$, avec $V_0 = 200 \text{ L}$ et $m = 100 \text{ kg}$, soit

$$v_0 = 2,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

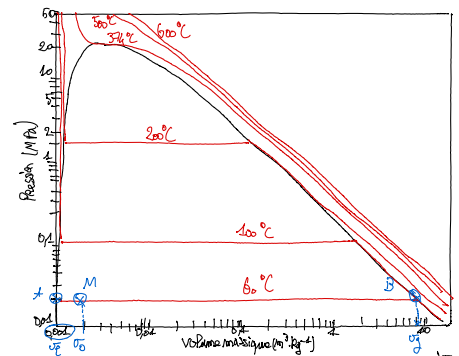
On est à $T = 60^\circ \text{C}$, soit avec le graphique un **mélange liquide-gaz**.

Le théorème des moments donne alors

$$x_g = \frac{AM}{AB} = \frac{v_0 - v_\ell}{v_g - v_\ell} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} v_\ell = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \\ v_0 = 2,33 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \\ v_g = 8 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \end{cases}$$

$$\text{A.N. : } x_g = 1,25 \times 10^{-4}$$

$$\text{D'où} \quad \begin{cases} m_g = m x_g = 13 \text{ g} \\ m_\ell = m(1 - x_g) \approx 100 \text{ kg} \end{cases}$$



- 4) Sous quelle forme trouve-t-on l'eau après l'échauffement accidentel? Déterminer la pression P correspondante. Commenter.

Réponse

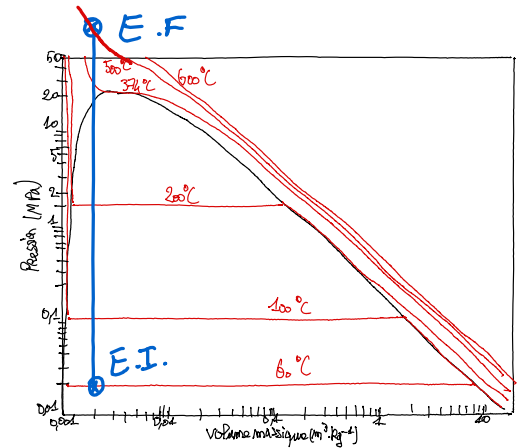
Volume V fixé et masse m fixée, donc v fixé : on se déplace verticalement depuis v_0 pour atteindre l'isotherme 500°C . On est alors dans l'état **supercritique**. Avec $V = V_0$,

$$\underbrace{\ln\left(\frac{V}{V_0}\right)}_{=0} = \alpha(T - T_0) - \chi_T(P - P_0)$$

$$\Leftrightarrow P = P_0 + \frac{\alpha(T - T_0)}{\chi_T}$$

$$\Rightarrow P = 2,1 \times 10^3 \text{ bar}$$

Il a donc **risque d'explosion** !



- 5) 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.

Réponse

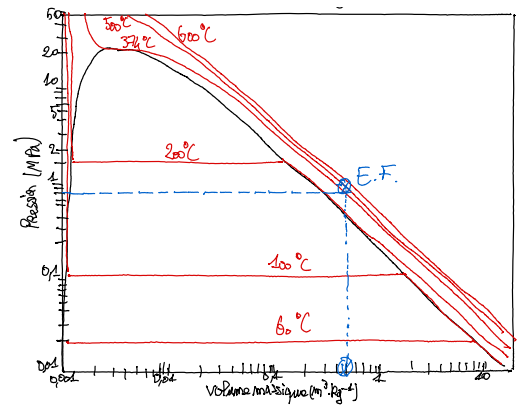
Toujours à V_0 , mais $m_0 = 400 \text{ g}$ donc

$$v_0 = 0,500 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

On est donc sur l'isotherme à 500°C pour l'abscisse v_0 ; on lit

$$P = 0,7 \text{ MPa} = 7 \text{ bar}$$

et le système est totalement gazeux. **Il n'y a plus de risque d'explosion.**



IV Cycle 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

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

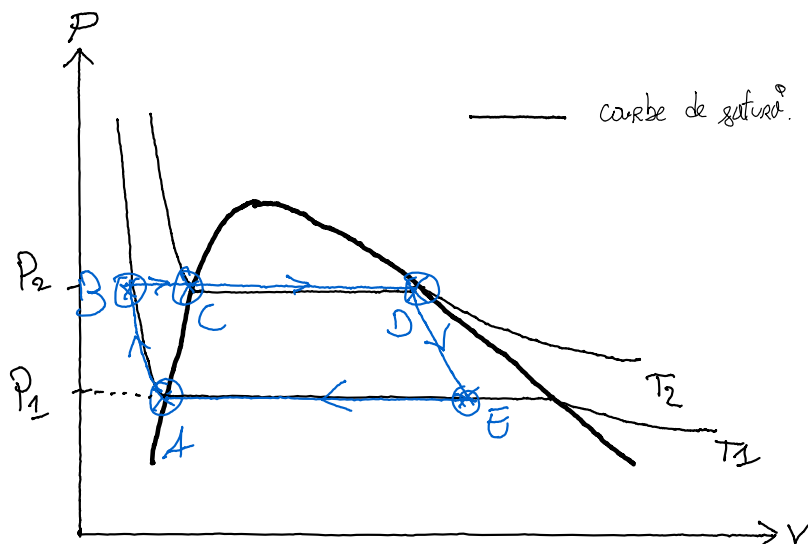
La variation d'entropie massique lors d'un changement d'état est :

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

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.

Réponse



- 2) a – Montrer que la variation $s_B - s_A$ est nulle.

Réponse

Pour un liquide,

$$\Delta s_{AB} = c_{\text{liq}} \ln \left(\frac{T_B}{T_A} \right) \quad \left. \begin{array}{l} \text{AB isoT} \\ \Rightarrow T_B = T_A \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta s_{AB} = 0$$

- b – Exprimer $s_C - s_B$ en fonction de c_{liq} , T_1 et T_2 .

Réponse

$$\Delta s_{BC} = s_C - s_B = c_{\text{liq}} \ln \left(\frac{T_C}{T_B} \right) \Leftrightarrow s_C - s_B = c_{\text{liq}} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$$

- c – Exprimer $s_D - s_C$ en fonction de $h_g(T_2)$, $h_\ell(T_2)$ et T_2 .

Réponse

CD est une vaporisation totale, il y a donc transition de phase :

$$\Delta s_{CD} = s_D - s_C = \frac{\Delta h_{CD}}{T_2}$$

$$\Leftrightarrow s_D - s_C = \frac{h_g(T_2) - h_\ell(T_2)}{T_2}$$

- d – Calculer $s_E - s_D$.

Réponse

DE est adiabatique, soit $Q = 0 \Rightarrow S_{\text{ech,DE}} = 0$ et réversible, soit $S_{\text{cr,DE}} = 0$: elle est donc **isentropique**, c'est-à-dire

$$\Delta s_{DE} \quad s_E - s_D = 0$$

- 3) Énoncer le théorème des moments.

Réponse

Sur un diagramme (P, v) de transition de phase liquide-vapeur, les titres massiques x_g et x_ℓ en gaz et liquide d'un équilibre diphasé se calculent par

$$x_g = \frac{MG}{LG} \quad \text{et} \quad x_\ell = \frac{LM}{LG}$$

avec M le point étudié de l'équilibre, L le liquide saturant correspondant et B la vapeur saturante correspondante.

- 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.

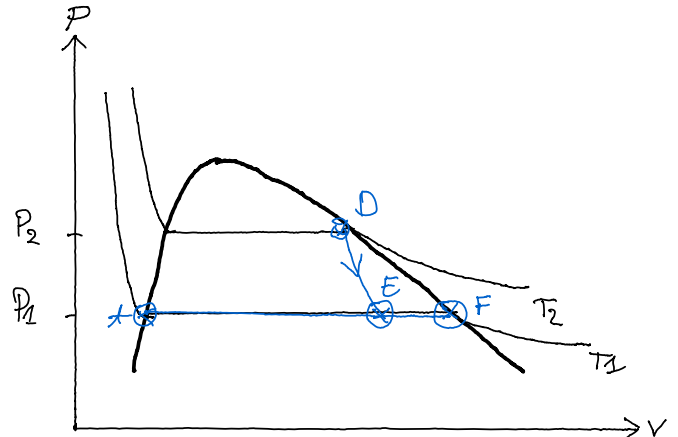
Réponse

Pour appliquer le théorème des moments, on prend E le point équivalent à M, A est équivalent à L et F le point équivalent à G. On a donc $x = \frac{AE}{AF}$.

Ainsi, $x = \frac{s_E - s_A}{s_F - s_A}$. Or, on sait d'après 2) d – que $s_E = s_D$, donc on peut réécrire

$$s_E - s_A = s_D - s_A = \frac{s_D - s_C}{\frac{h_g(T_2) - h_\ell(T_2)}{T_2}} + \frac{s_C - s_B}{c_{\text{liq}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} + \frac{s_B - s_A}{0}$$

$$\Leftrightarrow \Delta s_{AE} = \frac{h_g(T_2) - h_\ell(T_2)}{T_2} + c_{\text{liq}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + 0$$



On ne connaît pas *a priori* $s_F - s_A$. Cependant, cette transformation correspondrait à une transition de phase complète de vapeur saturante à (T_1, P_1) en liquide saturant à (T_1, P_1) , dont on connaît la variation d'enthalpie : $\Delta h_{AF} = h_g(T_1) - h_\ell(T_1)$. On connaît donc la variation d'entropie :

$$\Delta s_{AF} = s_F - s_A = \frac{h_g(T_1) - h_\ell(T_1)}{T_1}$$

$$\Leftrightarrow x = \frac{\frac{T_1}{T_2} \frac{h_g(T_2) - h_\ell(T_2)}{h_g(T_1) - h_\ell(T_1)} + T_1 \frac{c_{\text{liq}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{h_g(T_1) - h_\ell(T_1)}}{1}$$

avec $\begin{cases} T_1 = 338,15 \text{ K} & h_g(T_1) = 2,6184 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1} & h_\ell(T_1) = 272,02 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1} \\ T_2 = 378,15 \text{ K} & h_g(T_2) = 2,6834 \times 10^6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1} & h_\ell(T_2) = 4,4017 \times 10^5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1} \end{cases}$

$$\text{A.N. : } x = 0,922$$

Il y a donc 92,2 % de vapeur. On remonte ainsi à v_E par le théorème des moments :

$$x = \frac{v_E - v_\ell}{v_g - v_\ell}$$

$$\Leftrightarrow v_E = v_\ell + x(v_g - v_\ell)$$

$$\text{A.N. : } v_E = 5,72 \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$$

- 5) Calculer les transferts thermiques massiques échangés lors des transformations BCD et EA.

Réponse

Entre B et C, la transformation est isobare donc

$$\Delta H_{BC} = Q_{BC}$$

$$\Leftrightarrow \Delta H_{BC} = m c_{\text{liq}} (T_2 - T_1) \quad (\div m)$$

$$\Leftrightarrow q_{BC} = c_{\text{liq}} (T_2 - T_1)$$

Entre C et D, on a aussi une transformation isobare, donc

$$\Delta h_{CD} = q_{CD}$$

$$\Leftrightarrow h_g(T_2) - h_\ell(T_2) = q_{CD}$$

$$\Leftrightarrow q_{BCD} - c_{\text{liq}} (T_2 - T_1) + \underbrace{h_g(T_2) - h_\ell(T_2)}_{\Delta h_{\text{vap}}(T_2)}$$

On somme

$$\text{A.N. : } q_{BCD} = 2,41 \text{ MJ}$$

Entre E et A,

$$\Delta h_{EA} = q_{EA} = h_A - h_E$$

$$\Leftrightarrow q_{EA} = x(h_\ell(T_1) - h_g(T_1)) \quad \left. \begin{array}{l} h_A = h_\ell(T_1) \\ h_E = xh_g(T_1) + (1-x)h_\ell(T_2) \end{array} \right\}$$

$$\Delta h_{liq}(T_1)$$

A.N. : $q_{EA} = -2,16 \text{ MJ}$



Remarque

On **reçoit** bien de la chaleur lors de la vaporisation, on en **cède** lors de la liquéfaction.



6) Déterminer le rendement du cycle. Application numérique.

Réponse

Cycle dans le sens horaire donc **moteur** :

$$\eta = -\frac{W}{Q_C}$$

$$\Leftrightarrow \eta = \frac{q_C + q_F}{q_C}$$

$$\Leftrightarrow \eta = 1 + \frac{q_{EA}}{q_{BCD}}$$

$$\left. \begin{array}{l} w = \frac{W}{m} = -\frac{Q_C + Q_F}{m} \\ q_C = q_{BCD} = \frac{Q_C}{m} \\ q_F = q_{EA} = \frac{Q_F}{m} \end{array} \right\}$$

A.N. : $\eta = 0,102 \approx 10 \%$

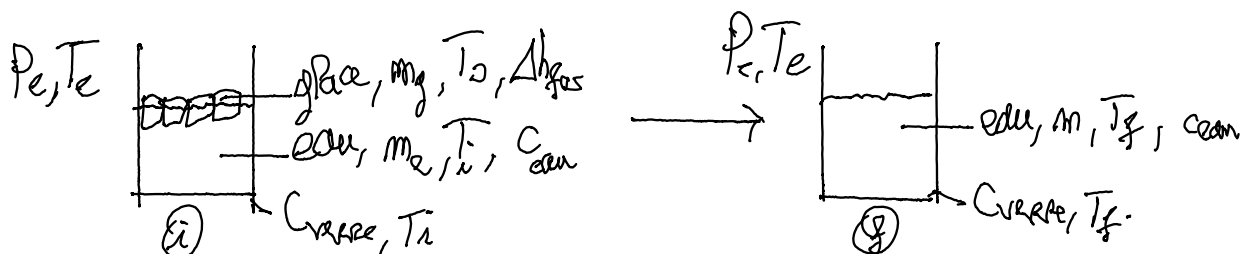


V Résolution de problème : coca-cola

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 ?

Réponse

On pose le système : transformation isobare donc $\Delta H = Q$, et transformation monotherme. Schéma :



On suppose que le coca est assimilable à de l'eau, de capacité $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Le système est initialement à l'équilibre, avec une masse de coca $m_e \approx 250 \text{ g}$ (verre de 300 mL pas rempli à ras bord).

On suppose que le verre a une capacité thermique non nulle, $C_{\text{verre}} \approx 300 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ (plus qu'un calorimètre).

On ajoute une masse m_g de glaçons à T_0 . Pour connaître leur nombre, il faut estimer la masse d'un glaçon, sachant que leur densité est $d_{\text{glace}} = 0,9$. En supposant un glaçon cubique de 2 cm de côté, on obtient $m_{\text{glaçon}} \approx 7 \text{ g}$.

On prend $\theta_i = 30^\circ \text{C}$.

Reste la plus grosse hypothèse : adiabatique ou pas ? ! On commence par supposer que oui, soit $Q = 0$. C'est donc un exercice de calorimétrie classique.

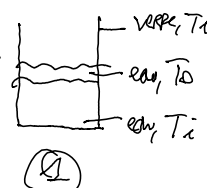
On suppose un état intermédiaire fictif (possible car H est une fonction d'état, donc on peut ajouter et soustraire des transformations) E1 où la glace a fondu (à 0 °C), et l'eau est à $T_i = 303 \text{ K}$. Sur cette transformation,

$$\Delta H_{\text{eau}, i \rightarrow 1} = 0 = \Delta H_{\text{verre}, i \rightarrow 1}$$

$$\Delta H_{\text{glace}, i \rightarrow 1} = m_g \Delta h_{\text{fus}}$$

Vient ensuite l'autre transformation de $1 \rightarrow f$, où le verre et l'eau refroidissent, et la glace maintenant fondue réchauffe :

$$\Delta H_{\text{eau}, 1 \rightarrow f} = m_e c_{\text{eau}} (T_f - T_i)$$



$$\begin{aligned}
& \Delta H_{\text{verre}, 1 \rightarrow f} = C_{\text{verre}}(T_f - T_i) \\
& \Delta H_{\text{glace}, 1 \rightarrow f} m_g c_{\text{eau}}(T_f - T_0) \\
\text{Ensuite,} \quad & \Delta H_{\text{tot}} = \Delta H_{i \rightarrow 1} + \Delta H_{1 \rightarrow f} = Q = 0 \\
& \Leftrightarrow 0 = m_g \Delta h_{\text{fus}} + (T_f - T_i)(m_e c_{\text{eau}} + C_{\text{verre}}) + (T_f - T_0)(m_g c_{\text{eau}}) \\
& \Leftrightarrow m_g(\Delta h_{\text{fus}} + c_{\text{eau}}(T_f - T_0)) = (T_i - T_f)(m_e c_{\text{eau}} + C_{\text{verre}}) \\
& \Leftrightarrow N \cdot m_{\text{glace}} = (T_i - T_f) \frac{m_e c_{\text{eau}} + C_{\text{verre}}}{\Delta h_{\text{fus}} + c_{\text{eau}}(T_f - T_0)} \\
& \Leftrightarrow \boxed{N = \frac{(T_i - T_f)}{m_{\text{glace}}} \frac{m_e c_{\text{eau}} + C_{\text{verre}}}{\Delta h_{\text{fus}} + c_{\text{eau}}(T_f - T_0)}} \\
& \text{A.N. : } N = 13,7
\end{aligned}$$

Donc il faudrait un minimum de 14 glaçons ! Si on souhaite une température finale de 8 °C, on passe à 12 glaçons, ce qui reste beaucoup.

Si $Q \neq 0$, alors il faut considérer les pertes thermiques par la surface du verre et par la surface en contact avec l'air :

$$\begin{cases} \mathcal{P}_v = g_v S_{\text{verre}}(T(t) - T_e) & \text{avec } S_{\text{verre}} = 2\pi r.h \\ \mathcal{P}_{\text{air}} = g_{\text{air}} S_{\text{air}}(T(t) - T_e) & \text{avec } S_{\text{air}} = \pi r^2 \end{cases}$$

et résoudre une équation différentielle...

