

TD 1 / Changements d'état des Corps Purs

Exercice 01:

Dans un ballon de 150 litres avec un vide préalable, on a introduit 1,4 kg d'eau sous la pression de 1 bar. On a ensuite chauffé le ballon jusqu'à ce que la pression intérieure atteigne 16,5 bars. Quelle est la composition du fluide contenu dans le ballon ?

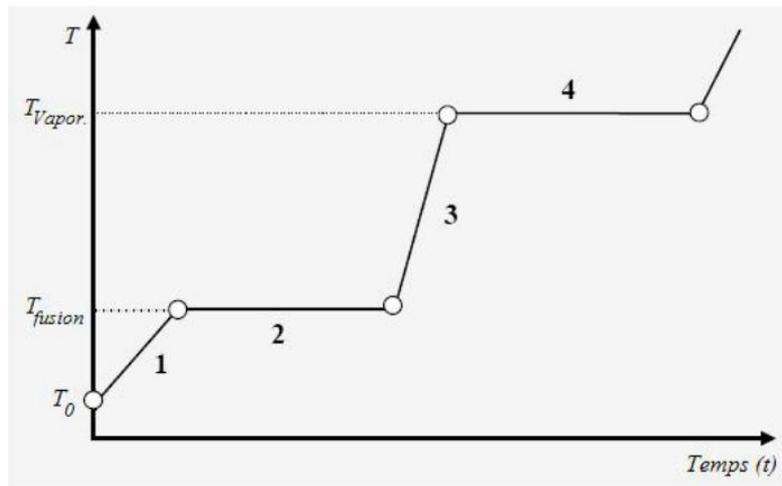
Exercice 02:

Considérons un système composé initialement d'une masse m d'un corps pur à l'état solide à une température T_0 inférieure à la température de fusion. Ce système reçoit du milieu extérieur une certaine quantité de chaleur et à l'état final, le corps est à l'état vapeur. Nous représentons schématiquement ci-dessous l'évolution de la température du système au cours de cette transformation en fonction du temps.

Calculer :

- 1°/ La quantité de chaleur Q_1 reçue par le système lors de son échauffement jusqu'à F_{usion} .
- 2°/ La chaleur absorbée Q_2 par le système lors du changement d'état: solide-liquide.
- 3°/ La quantité de chaleur Q_3 reçue par le système provoquant l'échauffement de la masse m du liquide jusqu'à sa température d'ébullition.
- 4°/ La quantité de chaleur Q_4 reçue par le système provoquant la vaporisation totale de la masse m du liquide (changement d'état : liquide-vapeur).

On donne pour l'eau à la pression atmosphérique: La masse du système est $m = 1$ g de glace; $T_0 = -20$ °C; $p = 1$ bar; $F_{\text{usion}} = 0$ °C; $T_{\text{Vap}} = 100$ °C; $L_f(0$ °C) = 335 kJ/kg; $L_v(100$ °C) = 2250 kJ/kg. Les chaleurs spécifiques sont considérées constantes dans l'intervalle de température (-20 °C-100 °C) : $1,2 = C_p^s$ kJ/kg.K; $18,4 = C_p^l$ kJ/kg.K

**Exercice 03 :**

Un thermoplongeur de 1200 W est placé dans un béccher contenant de l'eau. A partir du moment où l'eau commence à bouillir, calculer le temps nécessaire pour que 500 g d'eau soient vaporisés. On néglige les pertes de chaleur. On donne : $L_v = 23.105$ J/kg.

Exercice 04 :

On désire fondre 150 kg d'aluminium. On dispose de lingots d'Aluminium à 25°C.

- 1°/ Calculer la quantité minimale de chaleur qu'il faut fournir pour fondre cette quantité d'Aluminium. Cette quantité de chaleur est produite par un four électrique ayant un rendement global de 60 %.
- 2°/ Calculer l'énergie électrique utilisée.

Exercice 05 :

Un explorateur met 500 g de glace à -20 °C dans une casserole qu'il place sur un réchaud. Après un certain temps, il constate que toute l'eau contenue dans la casserole s'est évaporée.

Calculer l'énergie minimale qu'il a fallu dépenser pour cette opération.

Exercice 06 :

La figure suivante représente un ensemble de courbes expérimentales, appelées isothermes d'Andrews, représentant la pression p d'une mole d'un fluide en fonction du volume V occupé, pour différentes températures, (diagramme de Clapeyron).

1°/ Déterminer les coordonnées (p_c, V_c) du point critique C.

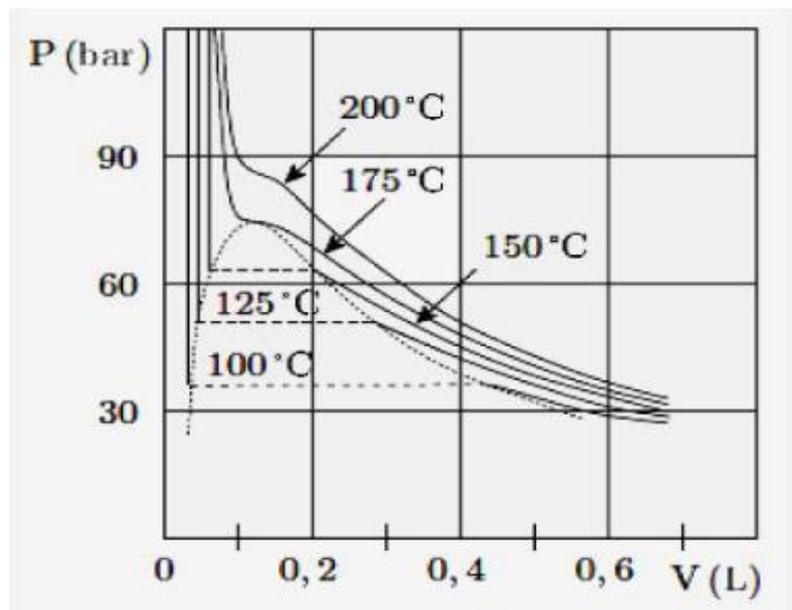
2°/ Préciser l'état physique du fluide et calculer les titres molaires x_v , et x_l de la vapeur et du liquide pour :

2.a) $V = 0,6$ litre et $T = 110\text{ °C}$

2.b) $p = 110$ bar et $T = 200\text{ °C}$

2.c) $V = 0,2$ litre et $T = 125\text{ °C}$

3°/ Que vaut le volume molaire de la vapeur saturante sèche à la pression de 40 bar ?

**Exercice 07 :**

Trouver les valeurs des variables d'état d'une vapeur humide de degré de sécheresse $x-1 = 0,06$ correspondant à la pression $p = 6$ bars et température de $T_s = 158\text{ °C}$.

Exercice 08 :

Pour amener une vapeur d'eau à la pression de 12 bars. On effectue une opération d'échauffement sur de l'eau initialement à 0 °C .

L'échauffement s'effectue sous une pression constante, et a consommé une quantité de chaleur de 650 kcal/kg.

Dans quel état est devenue cette vapeur ?

Solutions-TD1

Solution 01:

D'après la table des propriétés thermodynamiques de la vapeur d'eau saturante, on tire
 $V'' = 0.12 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Si toute l'eau introduite était sous forme de vapeur saturante sèche, sous la pression de 16,5 bars, elle occuperait un volume de $V = 1,4 \cdot 0,12 = 0,168 \text{ m}^3$, soit 168 litres, alors que le volume du ballon n'est que de 150 litres.

- Le fluide contenu dans le ballon est donc à l'état de vapeur humide.

Le volume massique :

$$V_x = 150 \cdot 10^3 / 1.4 = 0.107 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Le titre de la vapeur

$$x = v_x / V'' = 0.107 / 0.12 = 0.889$$

La masse de vapeur saturante sèche dans le mélange est:

$$m_v = x \cdot v = 0.889 \cdot 1.4 = 1.245 \text{ kg}$$

Par suite, la masse d'eau est :

$$m_e = m_l = m - m_v = 1.4 - 1.245 = 0.155 \text{ kg}$$

Solution 02:

1°/ La quantité de chaleur Q_1 reçue par le système lors de son échauffement jusqu'à T_{fusion} :
 Palier 1: échauffement du solide jusqu'à sa température de fusion, il s'agit donc d'une chaleur sensible.

$$\delta Q = m \cdot C_p^s \cdot dT$$

$$Q_1 = m \cdot \int_{T_0}^{T_{\text{fusion}}} C_p^s dT = m \cdot C_p^s (T_{\text{fusion}} - T_0) = 42 \text{ Joules.}$$

$$Q_1 = 42 \text{ joules.}$$

2°/ La chaleur Q_2 absorbée par le système lors du changement d'état (solide-liquide):

Palier 2: Changement d'état : solide-liquide

La quantité de chaleur Q_2 absorbée par le système pour la fusion totale de la masse m du solide en liquide sans augmentation de sa température (chaleur latente) est :

$$Q_2 = L_f \cdot m = 335 \text{ Joules.}$$

3°/ La quantité de chaleur Q_3 reçue par le système lors de son échauffement jusqu'à $T_{\text{ébullition}}$

Palier 3: échauffement du liquide jusqu'à sa température d'ébullition, il s'agit donc d'une chaleur sensible.

$$\delta Q_3 = m \cdot C_p^l \cdot dT$$

$$Q_3 = m \cdot C_p^l (T_{\text{ébullition}} - T_{\text{fusion}}) = 418 \text{ Joules.}$$

4°/ La quantité de chaleur Q_4 reçue par le système provoquant la vaporisation totale de la masse m du liquide (changement d'état : liquide-vapeur):

Palier 4: Changement d'état : liquide-vapeur : il s'agit donc d'une chaleur latente de vaporisation

$$Q_4 = L_v \cdot m = 2250 \text{ Joules.}$$

Solution 03 :

Le temps de vaporisation : Pour le changement d'état : eau-vapeur, il faut fournir une quantité de chaleur de :

$$Q = m \cdot L_v = 0,500 \cdot 23 \cdot 10^5 = 11,5 \cdot 10^5 \text{ Joules}$$

Pour fournir cette énergie avec un thermoplongeur de 1200 W, il faut un temps de :

$$\Delta t = Q/P = 11,5 \cdot 10^5 / 1200 = 958,33 \text{ s.}$$

Solution 04 :

La température de fusion de l'aluminium est : $660,3^{\circ}\text{C}$.

1°/ Pour fondre ces lingots, il faut :

a) amener les lingots à la température de $660,3^{\circ}\text{C}$

$$Q_1 = m_{\text{alu}} c_{\text{alu}} \Delta T$$

$$Q_1 = 150.900. (660,3 - 25)$$

$$Q_1 = 8,58 \cdot 10^5 \text{ Joules.}$$

b) Fondre les lingots d'aluminium :

$$Q_2 = m_{\text{alu}} L_f$$

$$Q_2 = 150.0,9610^5 \text{ Joules.}$$

$$Q_2 = 5,9410^7 \text{ Joules.}$$

Soit au total :

$$Q_{\text{tot}} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_{\text{tot}} = 1,45 \cdot 10^8 \text{ Joules. (Energie utile)}$$

2°/ Comme le rendement est de 60 %, l'énergie électrique à fournir est de :

$$\Delta E_{\text{fournie}} = \frac{\Delta E_{\text{utile}}}{\eta} = 2,410^8 \text{ Joules}$$

Solution 05 :

1°/ Calcul de l'énergie minimale de vaporisation :

Trois étapes de calcul sont nécessaires :

a. Chauffer le lingot jusqu'à sa température de fusion

$$Q_1 = m c_{\text{plomb}} \Delta T = 2,5.129(327,5 - 24)$$

$$Q_1 = 9,79 \cdot 10^4 \text{ Joules.}$$

b. Fondre le lingot

$$Q_2 = m L_f$$

$$Q_2 = 2,50.0,2510^5 = 6,2510^4 \text{ Joules.}$$

c. Chauffer le plomb liquide

$$Q_3 = m c_{\text{plomb-liquide}} \Delta T$$

$$Q_3 = 2,5.140. (370 - 327,5) \text{ Joules.}$$

$$Q_3 = 1,4910^4 \text{ Joules.}$$

$$Q_{\text{tot}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

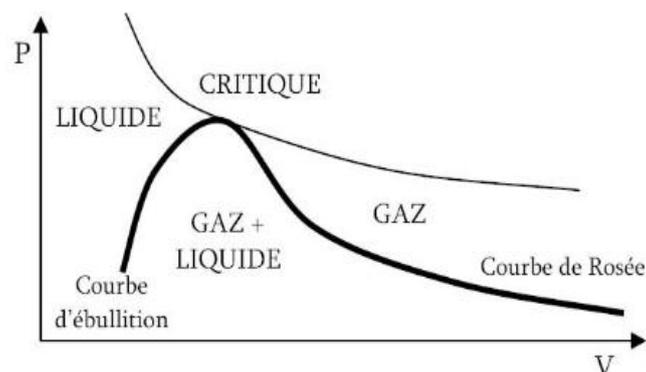
$$Q_{\text{tot}} = 1,68 \cdot 10^5 \text{ Joules}$$

Il obtient donc, la quantité d'énergie minimale de vaporisation :

$$\Delta E_{\text{consommée}} \approx Q_{\text{tot}} / 0,73 \approx 2,4 \cdot 10^5 \text{ Joules.}$$

Solution 06 :

1°/ Mise en évidence des états du fluide sur le diagramme ci-dessous.



Le point critique est le point au sommet de la courbe, reliant la courbe de rosée et la courbe d'ébullition. On lit : $p_C = 75$ bars et $V_C = 0.1$ litre.

2°/ Etat physique du fluide :

2.a) Pour : $V = 0,6$ litre et $T = 110$ °C, forme gazeuse non saturée, avec $x_v = 1$ et $x_l = 0$.

2.b) Pour : $p = 110$ bar et $T = 200$ °C, forme critique, les titres en vapeur et en liquide ne sont pas définis.

2.c) Pour : $V = 0,2$ litre et $T = 125$ °C, mélange liquide + vapeur, avec $x_v = 0.6$ et $x_l = 0.4$.

3°/ Pour une vapeur saturante sèche = située sur la courbe de rosée. A la pression de 40 bars, on lit $V = 0,39$ litre.

Solution 07 :

On a : $x = 1 - 0.06 = 0.94$

A la température : $T_s = 158$ °C et d'après la table des propriétés thermodynamiques de la vapeur d'eau saturante, on tire :

$$\begin{aligned}v'' &= 0.3214 \text{ m}^3/\text{kg} \\h' &= 159.4 \text{ Kcal}/\text{kg} \\s' &= 0.4594 \text{ Kcal}/\text{kg.K}\end{aligned}$$

1°/ Le volume spécifique :

$$v_x = x \cdot v'' = 0.94 \cdot 0.3214 = 0.302 \text{ m}^3/\text{kg}$$

2°/ Enthalpie de la vapeur humide:

$$h_x = h' + x \cdot L_v$$

3°/ Pour une pression $p = 6$ bars, et d'après la table des propriétés thermodynamiques de la vapeur d'eau saturante, on tire la chaleur latente de vaporisation : $L_v = 498,9$ kcal/kg.

$$h_x = 159,6 + 0.94 \cdot 498,9 = 629,4 \text{ kcal/kg.}$$

4°/ Entropie :

$$\begin{aligned}S_x &= S' + x \frac{L_v}{T_s} \\S_x &= 0,4594 + 0,94 \frac{498,9}{158,08 + 273} \\S_x &= 1,526 \text{ kcal/kg.}\end{aligned}$$

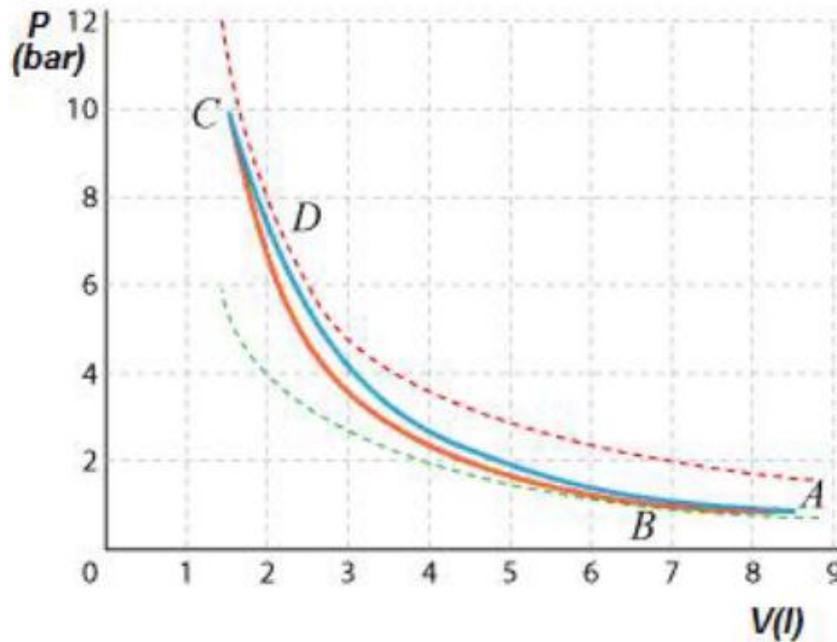
4°/ Energie interne :

$$\begin{aligned}S_x &= S' + x \frac{L_v}{T_s} \\U_x &= h_x - p v_x \\U_x &= 629,4 - \frac{6 \cdot 10^5 \cdot 1,013 \cdot 0,302}{4186,8} \\U_x &= 585,7 \text{ kcal/kg.}\end{aligned}$$

D'où

$$p_D = 7,2 \text{ bars.}$$

2°/ Le tracé du cycle dans un diagramme de Clapeyron est donné sur la figure ci-dessous.



3°/ Les échanges de chaleur ont lieu au cours des compressions et détentes isothermes. La variation d'énergie interne du gaz parfait étant nulle au cours de ces transformations, et celles-ci étant supposées quasi-statiques, on a

$$\delta Q = p dV = nRT \frac{dV}{V}$$

Après intégration, on obtient sur l'isotherme T_1 :

$$Q_1 = n R T_1 \ln \frac{V_D}{V_C} = p_C V_C \ln \frac{V_D}{V_C}$$

De même sur l'isotherme T_2 :

$$Q_2 = p_A V_A \ln \frac{V_B}{V_A}$$

Application numérique :

$$Q_1 = 10.101325.0,001 \ln \frac{2,1}{1,5} = 511 \text{ Joules.}$$

Est la chaleur reçue par le gaz de la source chaude.

$$Q_2 = 101325.0,0085 \ln \frac{6,6}{5,1} = -286 \text{ Joules.}$$

Est la chaleur donnée par le gaz à la source froide.

Au cours du cycle :

$$\Delta U = Q_1 + Q_2 + W = 0$$

D'où :

$$W = -Q_1 - Q_2 = -225 \text{ Joules.}$$

Le premier principe permet d'écrire:

$$Q_1 + Q_2 + W = 0$$

Le second principe permet d'écrire :

$$\frac{Q_1}{T} + \frac{Q_2}{T_f} = 0$$

Avec

$$Q_1 = -m \cdot c \cdot dT$$

Ce que perd la pompe comme chaleur est de signe négatif.

Quantité de chaleur cédée par l'eau du lac :

$$\frac{Q_2}{T_f} = -\frac{m \cdot c}{T} dT$$

$$Q_2 = T_f \cdot m \cdot c \cdot \ln \frac{T_c}{T_0}$$

$$Q_2 = 280.4190.1000 \ln \frac{333}{293} = 150 \text{ MJ.}$$

Quantité de chaleur reçue par l'eau de la réserve :

$$Q_1 = -M \cdot c \cdot (T_c - T_0)$$

$$Q_1 = -1000.4190 \cdot (333 - 293) = -167,6 \text{ MJ.}$$

2°/ Travail reçu par la pompe à chaleur :

$$Q_1 + Q_2 + W = 0$$

$$W = 167,6 - 150 = 17,6 \text{ MJ}$$

3°/ Coefficient moyen de performance de la pompe :

Le coefficient de performance est la chaleur absorbée par la source chaude sur le travail fourni

$$\eta = \frac{|Q_1|}{W} = \frac{167,6}{17,6} = 9,52$$