

# Exercices : Thermodynamique

---

## 1.3 Exercices d'application

### 1.3.1 Mélange eau-glace

On mélange sous  $P = 1 \text{ bar}$  ( $10^5 \text{ Pa}$ ) une masse  $m_1$  d'eau liquide à  $T_1 = 300 \text{ K}$  et une masse  $m_2$  de glace à  $T_2 = 270 \text{ K}$ . La température de changement d'état sous cette pression est  $T_f = 273 \text{ K}$ , avec une enthalpie de fusion  $l_f = 334 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . Les capacités thermiques massiques de l'eau liquide et de la glace sont respectivement  $c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $c_2 = 2,1 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

On suppose que le récipient dans lequel évolue le système est calorifugé : on considère la transformation adiabatique et isobare.

- A partir de quelle valeur du rapport  $m_1/m_2$ , l'eau est-elle intégralement liquide dans l'état final ?
- Même question pour un état solide.
- Entre les deux valeurs trouvées précédemment, que est l'état du système à l'équilibre ?

### 1.3.2 Détermination de l'état du fluide

A la sortie d'une turbine, sous  $p = 20 \text{ bar}$ , un fluide a été récupéré. L'équilibre liquide-vapeur a lieu à  $T_e$ . Son enthalpie massique est notée  $h$ . Les tables de vapeur fournissent les renseignements suivants :

| Pression | Température           | Enthalpie massique du liquide saturant | Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche |
|----------|-----------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 20 bar   | $T_e = 485 \text{ K}$ | $h_l = 909 \text{ kJ.kg}^{-1}$         | $h_v = 2801 \text{ kJ.kg}^{-1}$                 |

Déterminer l'état du fluide si  $h = 2000 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . Quelle est alors la température ?

### 1.3.3 Détente de Joule-Kelvin du fréon dans une machine frigorifique

Dans une machine frigorifique, du fréon subit une détente de Joule-Kelvin de l'état A à l'état B.  $x$  désignant le titre en vapeur, on donne  $T_A = 303 \text{ K}$ ,  $P_A = 7,5 \text{ bar}$ ,  $x_A = 0$  et  $T_B = 263 \text{ K}$ ,  $P_B = 2,2 \text{ bar}$ , l'enthalpie de vaporisation à  $T = 263 \text{ K}$  notée  $l_v = 159 \text{ kJ.kg}^{-1}$  et la capacité thermique massique du fréon liquide  $c = 0,96 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  supposée indépendante de la température. Calculer le titre massique en vapeur  $x_B$  dans l'état final et la variation d'entropie massique du fluide  $\Delta s_{AB}$ .

## 1.4 Exercices

### 1.4.1 Liquéfaction du dioxyde de carbone\*

Un cylindre à parois diathermanes contient du dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  et est maintenu par un thermostat à la température  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ . Il est initialement sous une pression  $P_0 = 1$  bar et occupe alors un volume  $V_0 = 100$  L. On réduit réversiblement le volume du fluide au centième. Pour simplifier, on assimilera la vapeur de  $\text{CO}_2$  à un gaz parfait.

- Représenter la transformation subie par le dioxyde de carbone dans le diagramme de Clapeyron.
- À quelle pression s'attend-on à observer la condensation de la première goutte de liquide ? Comparer à la pression de vapeur saturante expérimentale  $P_s = 34,6$  bar à  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ .
- Quel est le titre en vapeur à la fin de l'expérience ?
- Calculer la variation d'énergie interne  $\Delta U$ , la variation d'enthalpie  $\Delta H$  et la variation d'entropie.
- Calculer le travail de compression ainsi que le transfert thermique reçu du thermostat.

Données :

- Masse molaire  $M = 44 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,
- Coordonnées du point critique  $P_c = 74 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  et  $V_{mc} = 0,095 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$  et  $T_c = 304 \text{ K}$ ,
- Coordonnées du point triple  $T_t = 216 \text{ K}$  et  $P_t = 5,1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,
- Volume massique de la vapeur saturante à  $T_0 = 0^\circ\text{C}$   $v_v = 0,010 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,
- Masse volumique du liquide à saturation  $\rho_l = 912 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,
- Chaleur latente de vaporisation à  $T_0 = 0^\circ\text{C}$   $l_v = 232 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

### 1.4.2 Vaporisation réversible ou irréversible : bilan entropique\*

a) Une masse de 1 kg d'eau liquide est contenue dans un récipient fermé par un piston, à  $100^\circ\text{C}$  sous 1 atm. Par déplacement infiniment lent du piston, l'ensemble étant dans un thermostat à  $100^\circ\text{C}$ , on réalise la vaporisation totale de l'eau. À l'état final, le volume  $V_f$  est égal à  $1,67 \text{ m}^3$ .

Données :

- Chaleur latente massique de vaporisation  $L_v = 2,25 \cdot 10^6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;
- $1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .

Calculer la chaleur fournie par le thermostat, le travail échangé, les variations d'énergie interne, d'enthalpie et d'entropie de l'eau.

b) On place directement 1 kg d'eau liquide, prise à  $100^\circ\text{C}$ , dans un récipient thermostaté à  $100^\circ\text{C}$ , initialement vide, et de volume  $V_f = 1,67 \text{ m}^3$ . L'eau s'y vaporise instantanément. Déterminer les mêmes grandeurs qu'au a) ainsi que la création d'entropie.

### 1.4.3 Compression isotherme d'un mélange liquide-vapeur\*\*

On considère un cylindre droit, dont la base a une surface  $s = 100 \text{ cm}^2$ , fermé par un piston mobile sans frottement et de masse négligeable. On désigne par  $h$  la hauteur de ce cylindre ; ses parois sont parfaitement perméables à la chaleur et il est placé dans un thermostat de température constante  $T_0 = 373 \text{ K}$ .

On enferme dans ce cylindre un mélange équimolaire d'air et de vapeur d'eau, tous les deux considérés comme des gaz parfaits, sous une pression totale  $2 P_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ . La hauteur initiale du cylindre est  $h_0 = 20 \text{ cm}$ . On donne :

- pression d'équilibre liquide-vapeur de l'eau à  $373 \text{ K}$  :  $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$ ,
- masse molaire de l'eau  $M_0 = 18 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,
- chaleur latente de vaporisation de l'eau à  $373 \text{ K}$  :  $L_0 = 2250 \cdot 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,
- volume massique de l'eau liquide négligeable devant celui de la vapeur,
- $R = 8,32 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$  constante des gaz parfaits.

On augmente très progressivement la pression jusqu'à la valeur finale :  $3 P_0 = 3 \cdot 10^5$  Pa. On supposera le volume massique de l'eau liquide négligeable devant celui de la vapeur.

- Déterminer les pressions partielles  $P_{af}$  et  $P_{vf}$  de l'air et de la vapeur d'eau, ainsi que la hauteur  $h_f$  du cylindre dans l'état final.
- Par rapport à la masse d'eau totale, quelle proportion se trouve sous forme vapeur dans l'état final ?
- Quelle aura été la variation d'énergie interne  $\Delta U$  du contenu du cylindre lors de cette transformation ? Représenter la transformation effectuée pour l'eau dans un diagramme (P,v).

#### 1.4.4 Titres massiques en vapeur, Echauffement isochore\*\*

Un cylindre indilatable, bon conducteur thermique, de capacité thermique négligeable a une longueur totale de 1 m et une section,  $s$ , de  $1 \text{ m}^2$ . Une paroi mobile, repérée par sa coordonnée  $y$  (telle que  $0 \leq y \leq 1$ ) le divise en deux compartiments A et B (tels que  $l_A = y$  et  $l_B = 1 - y$ ). A et B étant initialement vides, on introduit  $m_A = 180 \text{ g}$  d'eau ( $M_e = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) dans A et  $m_B = 1800 \text{ g}$  d'eau dans B. On appelle  $x = m_v/m$  le titre en vapeur.

1) Le cylindre est dans un thermostat à  $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T = 373 \text{ K}$ ).

1.a)  $y$  est fixée à  $0,5 \text{ m}$  ; déterminer dans chaque compartiment l'état physique de l'eau ; calculer avec précision  $x_B$ . En déduire la force  $F$  s'exerçant sur le piston.

Données :

- $P_s(100^\circ\text{C}) = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$  ;
- la vapeur d'eau est assimilée à un gaz parfait :  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
- L'eau liquide a pour masse volumique  $\rho_l = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  peu dépendante de  $T$ .

1.b) Si  $y$  varie de  $0$  à  $1 \text{ m}$ , tracer la courbe  $F(y)$ .

2) On fixe définitivement  $y = 0,5 \text{ m}$ , et on porte brusquement le cylindre dans un autre thermostat à  $T' = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ , puis on attend l'équilibre. On donne  $P'_s(150^\circ\text{C}) = 5 \text{ bar}$ .

2.a) Déterminer le nouveau titre  $x'_B$ . Représenter dans un diagramme (P,v) la transformation effectuée dans le compartiment B.

2.b) Calculer la chaleur totale reçue par le système dans la transformation.

Données :

- chaleur latente massique de vaporisation de l'eau : - à  $T' = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $L'_v = 2090 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  
- à  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $L_v = 2240 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,
- capacité thermique isochore de la vapeur d'eau :  $c_{vg} = 1,46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,
- capacité thermique du liquide saturant :  $c_l = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

2.c) Calculer la variation d'entropie du système ainsi que celle de la source. Conclusion ?

#### 1.4.5 Vaporisation sur une cuve à mercure \*\*\*

Un tube barométrique cylindrique vertical de section  $S = 1 \text{ cm}^2$  plonge dans une cuve à mercure en contact avec l'atmosphère à la pression  $P_0$ . L'ensemble est maintenu à la température  $T_0 = 293 \text{ K}$ . La longueur utile (c'est-à-dire émergée) du tube est  $l = 100 \text{ cm}$ . La pression atmosphérique est  $H = 76 \text{ cm Hg}$ .

a) On introduit  $74 \text{ mg}$  d'éther, de masse molaire  $M = 74 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ . La pression de vapeur saturante de l'éther à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  est  $P_s = 44 \text{ cm Hg}$ . On pourra utiliser la masse volumique du mercure liquide ( $\rho = 13,6 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) ou le volume molaire des gaz parfaits ( $V_m = 22,4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ ).

Déterminer l'état physique de l'éther.

Préciser la hauteur  $h_0$  de mercure dans le tube.

b) On incline le tube, la longueur utile restant  $l = 1 \text{ m}$ . Déterminer l'angle  $\alpha$  entre l'horizontale et l'axe du tube pour lequel apparaît la première goutte de liquide.