

Diagrammes d'état des fluides réels purs

6 Exercices

6.1 Mélange eau-glace

On mélange sous $P = 1 \text{ bar}$ (10^5 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.

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

6.2 Energie récupérable lors de la condensation totale d'un fluide

Un fluide change d'état sous pression constante P aux températures de fusion T_f et de vaporisation T_v . Les enthalpies massiques sont respectivement l_f et l_v . La capacité thermique massique du corps pur à l'état liquide est notée c , elle est supposée indépendante de la température et de la pression.

- 1) Détailler les transformations permettant d'effectuer réversiblement la condensation totale de l'unité de masse de fluide, de manière isobare, à la pression P .
- 2) Quel est le transfert thermique reçu par l'unité de masse de fluide au cours de cette évolution ? Commenter le signe.
- 3) Faire l'application numérique si le fluide est de l'eau, sous pression $P = 10^5 \text{ Pa}$. On adoptera les valeurs $c \approx 4,2 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $l_f = 334 \text{ kJ.kg}^{-1}$

6.3 Détermination de l'état d'une vapeur

On considère un extrait d'une table thermodynamique d'un fluide très utilisé dans les installations domestiques.

Pression	Température	Enthalpie massique du liquide saturant	Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche
5 bar	$T = 273 \text{ K}$	$h_l = 200 \text{ kJ.kg}^{-1}$	$h_v = 405 \text{ kJ.kg}^{-1}$
13 bar	$T = 307 \text{ K}$	$h_l = 242 \text{ kJ.kg}^{-1}$	$h_v = 416 \text{ kJ.kg}^{-1}$

- 1) Quelles sont l'enthalpie et l'entropie massiques de vaporisation de ce fluide à 0°C ?
- 2) Préciser la température et l'enthalpie massique d'un mélange liquide-vapeur de titre massique égal à 30%, sous une pression de 13 bar.
- 3) Une évolution isenthalpique fait passer une quantité fixée de fluide, de la pression 13 bar à la pression 5 bar. L'état initial est liquide saturant. Déterminer la température et la composition du fluide après évolution.
- 4) Lorsque les pressions dans l'état initial et dans l'état final sont les mêmes que précédemment, mais à partir d'un état initial de vapeur saturante sèche, l'état final est-il un mélange liquide-vapeur ? Peut-on en préciser la température à l'aide des données fournies ?

6.4 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 Δs_{AB} .

Une détente de Joule-Kelvin (ou Joule-Thomson) est un écoulement stationnaire qui s'effectue lentement ($\Delta E_c = 0$) à travers un étranglement horizontal ($\Delta E_p = 0$), rigide ($W=0$) et calorifugé ($Q=0$). Une telle détente est isenthalpique $\Delta H = 0$.

6.5 Machine à vapeur

Dans un cycle de machine à vapeur, la phase motrice est une détente de la vapeur d'eau dans un cylindre fermé par un piston mobile.

Cette détente est suffisamment rapide pour que les transferts thermiques puissent être négligés. On supposera également cette détente réversible.

Cette détente a lieu à partir de vapeur juste saturante à $T_1 = 485\text{ K}$ et on obtient un mélange liquide-vapeur à $T_2 = 373\text{ K}$. Les enthalpies de vaporisations sont $l_1 = 1892\text{ kJ/kg}$ à T_1 et $l_2 = 2258\text{ kJ/kg}$ à T_2 . On donne la capacité thermique de l'eau liquide : $c = 4,18\text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.

Calculer le titre en vapeur final (c'est-à-dire la fraction molaire finale en vapeur).

6.6 Machine à vapeur : cycle de Rankine

Dans une machine à vapeur, l'eau décrit un cycle de Rankine :

- AB : l'eau liquide (P_1, T_1) à saturation est comprimée de façon isentropique dans une pompe jusqu'à la pression P_2 de la chaudière. Cette transformation se fait pratiquement sans variation de volume. On raisonne sur l'unité de masse.

- BD et DE : l'eau liquide est injectée dans la chaudière, s'y réchauffe jusqu'à T_2 (BD) et s'y vaporise (DE) à la pression P_2 .

- EF : la vapeur est admise dans le cylindre à T_2, P_2 et on effectue une détente isentropique (d'où travail mécanique) jusqu'à la température initiale T_1 : on obtient un mélange liquide-vapeur de titre massique x en vapeur.

- FA : le piston par son retour chasse le mélange dans le condenseur où il se liquéfie totalement.

1) Donner l'allure du cycle en coordonnée P, v en faisant figurer les deux isothermes T_1 et T_2 . On justifiera que la température de B est très voisine de celle de A.

2) Exprimer le rendement de ce moteur thermique uniquement en termes enthalpiques : $\rho = f(H_A, H_B, H_D, H_E, H_F)$.

3) Donner l'allure du cycle en diagramme entropique (T, s).

4) A partir de données expérimentales, calculer le rendement du cycle (on confondra H_A et H_B).

Données :

P (bar)	T (°C)	Liquide		Vapeur	
		s_l (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	h_l (kJ.kg ⁻¹)	s_v (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	h_v (kJ.kg ⁻¹)
$P_1 = 0,2$	$T_1 = 60$	0,83	251	7,9	2608
$P_2 = 12$	$T_2 = 188$	2,2	798	6,52	2783

6.7 Compression isotherme d'un mélange liquide-vapeur

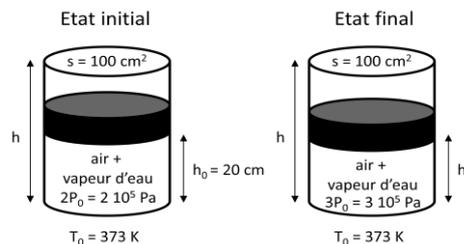
On considère un cylindre droit, dont la base a une surface $s = 100 \text{ cm}^2$, fermé par un piston mobile sans frottement et de masse négligeable. On désigne par h la hauteur de ce cylindre ; ses parois sont parfaitement perméables à la chaleur et il est placé dans un thermostat de température constante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

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 $2 P_0 = 2.10^5 \text{ Pa}$. La hauteur initiale du cylindre est $h_0 = 20 \text{ cm}$. On donne :

- pression d'équilibre liquide-vapeur de l'eau à 373 K : $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$,
- masse molaire de l'eau $M_0 = 18 \text{ g.mol}^{-1}$,
- chaleur latente de vaporisation de l'eau à 373 K : $L_0 = 2250.10^3 \text{ J.kg}^{-1}$,
- volume massique de l'eau liquide négligeable devant celui de la vapeur,
- $R = 8,32 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ constante des gaz parfaits.

On augmente très progressivement la pression jusqu'à la valeur finale : $3 P_0 = 3.10^5 \text{ Pa}$. On supposera le volume massique de l'eau liquide négligeable devant celui de la vapeur.

- 1) 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.
- 2) Par rapport à la masse d'eau totale, quelle proportion se trouve sous forme vapeur dans l'état final ?
- 2) Quelle aura été la variation d'énergie interne ΔU du contenu du cylindre lors de cette transformation ? Représenter la transformation effectuée pour l'eau dans un diagramme (P,v) .



6.8 Liquéfaction du dioxyde de carbone

Un cylindre à parois diathermanes contient du dioxyde de carbone CO_2 et est maintenu par un thermostat à la température $T_0 = 0^\circ\text{C}$. Il est initialement sous une pression $P_0 = 1 \text{ bar}$ et occupe alors un volume $V_0 = 100 \text{ L}$. On réduit réversiblement le volume du fluide au centième. Pour simplifier, on assimilera la vapeur de CO_2 à un gaz parfait.

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

Données : - Masse molaire $M = 44 \text{ g.mol}^{-1}$,

- Coordonnées du point critique $P_c = 74 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et $V_{mc} = 0,095.10^{-3} \text{ m}^3.\text{mol}^{-1}$ et $T_c = 304 \text{ K}$,
- Coordonnées du point triple $T_t = 216 \text{ K}$ et $P_t = 5,1.10^5 \text{ Pa}$,
- Volume massique de la vapeur saturante à $T_0 = 0^\circ\text{C}$ $v_v = 0,010 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$,
- Masse volumique du liquide à saturation $\rho_l = 912 \text{ kg.m}^{-3}$,
- Chaleur latente de vaporisation à $T_0 = 0^\circ\text{C}$ $l_v = 232 \text{ kJ.kg}^{-1}$