

7 Questions de cours

- 1) Définir la notion d'enthalpie massique de changement d'état. Citer des ordres de grandeur d'enthalpies massiques de vaporisation. Quelles transformations sont associées à des enthalpies massiques de changement d'état positives ?
- 2) Définir le titre massique en vapeur. Donner la règle des moments.
- 3) Représenter un diagramme de Clapeyron avec différentes isothermes et nommer les courbes qui s'y trouvent.
- 4) Représenter un diagramme entropique (T,s) avec différentes isobares et nommer les courbes qui s'y trouvent.
- 5) Sur un diagramme de Clapeyron, retrouver les équations des courbes isothermes, isobares, isochores, isentropiques et isenthalpes dans la limite du gaz parfait et dans la limite du liquide incompressible et indilatable.
- 6) Sur un diagramme entropique (T,s), retrouver les équations des courbes isothermes, isobares, isochores, isentropiques et isenthalpes dans la limite du gaz parfait et dans la limite du liquide incompressible et indilatable.

8 Exercices

8.1 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, quel est l'état du système à l'équilibre ?

8.2 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 $l_f = 334 \text{ kJ.kg}^{-1}$

8.3 Détermination de l'état du fluide

A la sortie d'une turbine, sous $p = 20$ 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 nous donnent :

Pression	Température	Enthalpie massique du liquide saturant	Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche
20 bar	$T_e = 485$ 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 ?

8.4 Détermination de l'état d'une vapeur

Voici un extrait d'une table thermodynamique d'un fluide utilisé dans les installations domestiques.

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

8.5 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 ($^\circ\text{C}$)	Liquide		Vapeur	
		$s_l (\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$	$h_l (\text{kJ.kg}^{-1})$	$s_v (\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$	$h_v (\text{kJ.kg}^{-1})$
$P_1 = 0,2$	$T_1 = 60$	0,83	251	7,9	2608
$P_2 = 12$	$T_2 = 188$	2,2	798	6,52	2783

8.6 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).