

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.
- 2) Quelles transformations sont associées à des enthalpies massiques de changement d'état positives ?
- 3) Lier la variation élémentaire de l'enthalpie à l'enthalpie de changement d'état.
- 4) Définir le titre massique en vapeur.
- 5) Donner la règle des moments.
- 6) Représenter un diagramme de Clapeyron avec différentes isothermes et nommer les courbes qui s'y trouvent.
- 7) Représenter un diagramme entropique (T,s) avec différentes isobares et nommer les courbes qui s'y trouvent.
- 8) Sur un diagramme de Clapeyron, retrouver les équations des courbes isothermes dans la limite du gaz parfait et dans la limite du liquide incompressible et indilatable.
- 9) Sur un diagramme de Clapeyron, retrouver les équations des courbes isobares et isochores dans la limite du gaz parfait et dans la limite du liquide incompressible et indilatable.
- 10) Sur un diagramme de Clapeyron, retrouver les équations des courbes isentropiques dans la limite du gaz parfait et dans la limite du liquide incompressible et indilatable.
- 11) Sur un diagramme de Clapeyron, retrouver les équations des courbes isenthalpes dans la limite du gaz parfait et dans la limite du liquide incompressible et indilatable.
- 12) Sur un diagramme entropique (T,s), retrouver les équations des courbes isobares dans la limite du gaz parfait et dans la limite du liquide incompressible et indilatable.
- 13) Sur un diagramme entropique (T,s), retrouver les équations des courbes isothermes et isentropiques dans la limite du gaz parfait et dans la limite du liquide incompressible et indilatable.
- 14) Sur un diagramme entropique (T,s), retrouver les équations des courbes isochores dans la limite du gaz parfait.
- 15) Sur un diagramme entropique (T,s), retrouver les équations des courbes isenthalpes dans la limite du gaz parfait.

8 Exercices

8.1 Mélange eau-glace

On mélange sous $P=1\text{bar}$ 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 $c_1=4,2.10^3\text{J.kg}^{-1}.K^{-1}$ et $c_2=2,1.10^3\text{J.kg}^{-1}.K^{-1}$.

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 sous forme de vapeur change d'état sous pression constante P d'une température initiale T_v (température de vaporisation) à une température finale T_f (température de fusion) pour aboutir sous forme solide. Les enthalpies massiques de vaporisation et fusion sont respectivement l_v et l_f . 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 envisagées sous forme de schéma. Comment appelle-t-on la transformation permettant de passer directement de l'état initial à l'état final ?
- 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 $P = 20 \text{ bar}$, 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
$P = 20 \text{ bar}$	$T_e = 485 \text{ K}$	$h_l(T_e) = 909 \text{ kJ.kg}^{-1}$	$h_v(T_e) = 2801 \text{ kJ.kg}^{-1}$

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

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	$T_1 = 273 \text{ K}$	$h_l(T_1) = 200 \text{ kJ.kg}^{-1}$	$h_v(T_1) = 405 \text{ kJ.kg}^{-1}$
13 bar	$T_2 = 307 \text{ K}$	$h_l(T_2) = 242 \text{ kJ.kg}^{-1}$	$h_v(T_2) = 416 \text{ kJ.kg}^{-1}$

- 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 :

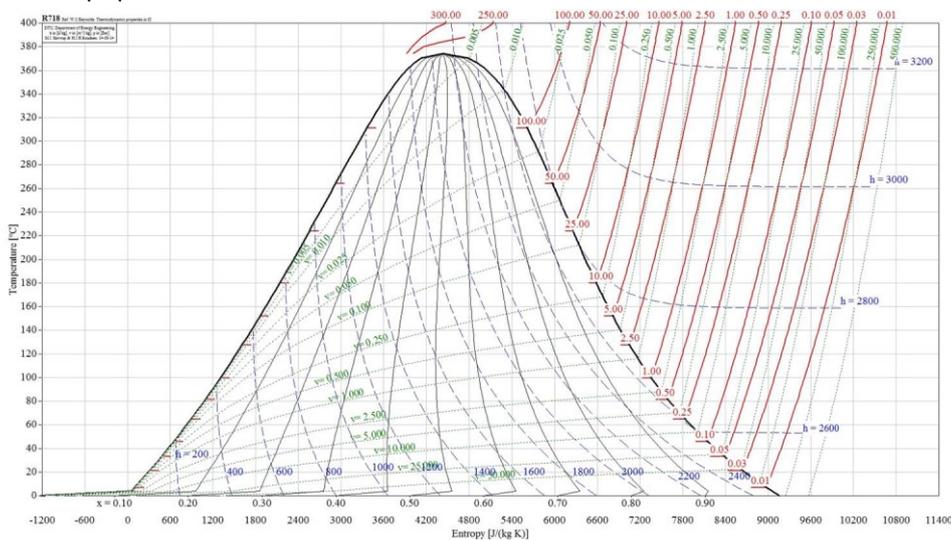
- AB : l'eau liquide (P_1, T_1) à saturation est comprimée de façon isentropique dans une pompe jusqu'à la pression P_2 de la chaudière. Cette transformation se fait pratiquement sans variation de volume. On raisonne sur l'unité de masse.
- BD et DE : l'eau liquide est injectée dans la chaudière, s'y réchauffe jusqu'à T_2 (BD) et s'y vaporise (DE) à la pression P_2 .
- EF : la vapeur est admise dans le cylindre (T_2, P_2) et on effectue une détente isentropique 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 dans le diagramme de Clapeyron 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) fourni.
- 4) A partir de données expérimentales, calculer le rendement du cycle.

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

Diagramme entropique de l'eau :



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

Calculer le titre en vapeur final. On pourra s'aider d'une représentation de la détente dans un diagramme entropique.

8.7 Centrale 2016 Physique-Chimie 1

En régime permanent d'écoulement, le fluide R134a subit les transformations suivantes (on peut se reporter à la figure 5)

- $1 \rightarrow 2$: le fluide à l'état gazeux sous la pression P_b est comprimé dans un compresseur à piston. Il ressort à la pression P_h . On considère que cette compression est isentropique ;
- $2 \rightarrow 3$: le gaz se refroidit de façon isobare jusqu'au condenseur (seau de droite contenant une masse d'eau m_e). On parle de désurchauffe. Au point 3 le gaz est assimilé à de la vapeur saturante sèche ;
- $3 \rightarrow 3'$: le gaz se condense au contact thermique de l'eau du condenseur (seau de droite) jusqu'au liquide saturé ;
- $3' \rightarrow 4$: dans le tuyau de cuivre, le liquide se refroidit de façon isobare jusqu'au détendeur. On parle de sous-refroidissement ;
- $4 \rightarrow 5$: le liquide subit une détente dans le détendeur ; il commence à se vaporiser ; la pression de sortie est P_b (manomètre de gauche). Cette détente peut être considérée comme adiabatique ;
- $5 \rightarrow 6$: le fluide poursuit sa vaporisation à la pression P_h notamment dans le serpentin évaporateur baignant dans de l'eau (seau de gauche contenant une masse d'eau m_e) ;
- $6 \rightarrow 1$: dans le tuyau de cuivre, le gaz se réchauffe de façon isobare jusqu'à l'entrée du compresseur. On parle de surchauffe. Elle permet de s'assurer qu'aucune goutte de liquide ne pénètre dans le compresseur.

On obtient le tableau 2.

	1	2	3	3'	4	5	6
P (bar)	2,9	6,8	6,8	6,8	6,8	2,9	2,9
θ (°C)	12	44	26	26	19	0	0
T (K)	285	317	299	299	292	273	273
x	vapeur sèche	vapeur sèche	1	0	Liquide	x_5	1
v ($m^3.kg^{-1}$)	0,073	0,033	0,030	$8,3 \times 10^{-4}$	$8,1 \times 10^{-4}$	0,012	0,070
h ($kJ.kg^{-1}$)	408	430	412	233	226	h_5	396
s ($kJ.K^{-1}.kg^{-1}$)	1,76	s_2	1,72	1,13	1,09	1,08	1,72

Tableau 2

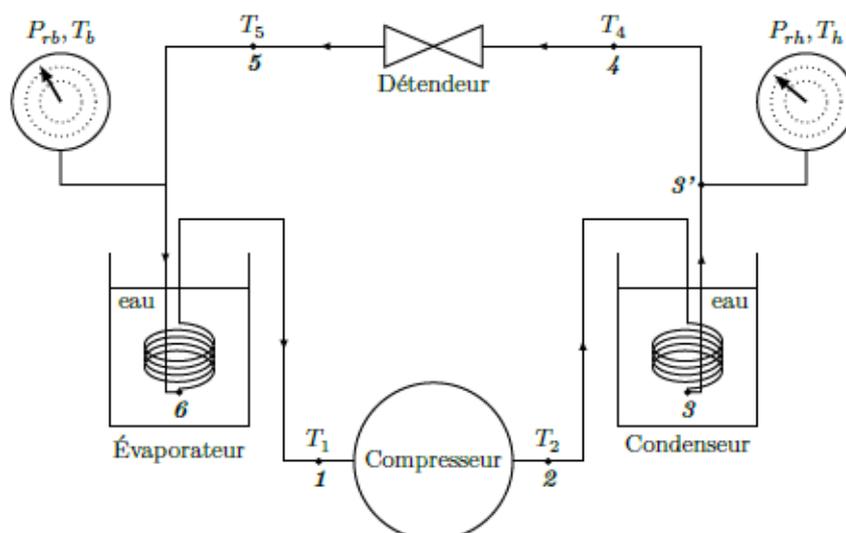


Figure 5 Schéma d'ensemble de la pompe à chaleur

II.B – Diagramme enthalpique

On considère le diagramme enthalpique (ou diagramme des frigoristes) fourni sur le document réponse. Sur ce diagramme, on peut identifier la courbe de saturation composée de la courbe d'ébullition (liquide saturé, $x = 0$, courbe de gauche) et de la courbe de rosée (vapeur saturante sèche, $x = 1$, courbe de droite). On peut également identifier les isotitres, les isothermes, les isentropiques et les isochores.

II.B.1) Commenter l'allure des isothermes dans chaque domaine (vapeur sèche, état diphasé, phase liquide).

II.B.2) Placer les points **1, 2, 3, 3', 4, 5** et **6** sur le diagramme des frigoristes et tracer le cycle parcouru par le fluide.

II.B.3)

a) Lors du changement d'état $A \rightarrow B$ d'un corps pur à la température T , quelle relation a-t-on entre $\Delta s_{AB}(T)$ et $\Delta h_{AB}(T)$?

b) Vérifier numériquement cette relation pour $T = 299$ K.

c) Déterminer graphiquement la valeur de l'enthalpie massique de vaporisation du fluide R134a pour $T = 273$ K. Commenter l'ordre de grandeur en comparant à des ordres de grandeur connus.

II.B.4) Déterminer la valeur de la fraction massique $x = m_g/m$ au point **5**.

