

## TD Thermodynamique n°5 Corps pur en équilibre biphasé

### Exercice 1 - L'eau dans tous ses états.

1. Calculer le volume massique de la glace à 0°C, celui de la vapeur d'eau à 100°C sous 1 bar sachant qu'elle se comporte comme un gaz parfait et celui de l'eau liquide considéré comme constant.

2. Calculer l'enthalpie massique de condensation de l'eau à 100°C et celle de solidification de l'eau à 0°C. En déduire l'énergie interne de condensation de l'eau à 100°C et celle de solidification de l'eau à 0°C. Que peut-on en conclure ?

3. Les tables thermodynamiques indiquent à 100°C et sous  $P = 1$  bar pour la vapeur d'eau :

- $h_v = 2673 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
- $s_v = 7,350 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

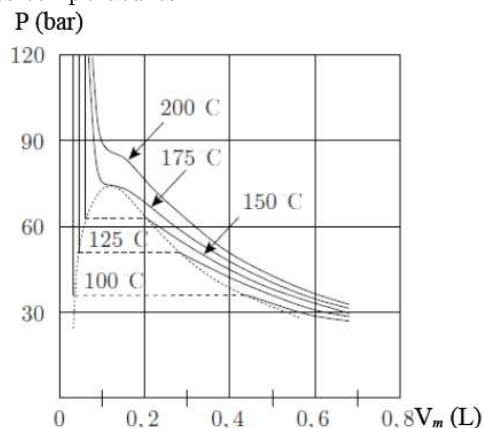
En déduire l'enthalpie massique  $h_\ell$  et l'entropie massique  $s_\ell$  de l'eau liquide prise dans les mêmes conditions puis l'enthalpie et l'entropie d'un mélange liquide-vapeur de masse totale  $m = 1,0 \text{ kg}$  et contenant  $m_v = 0,62 \text{ kg}$  de vapeur d'eau.

Données numériques :

- constante des gaz parfaits :  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
- masse molaire de l'eau :  $M = 18,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
- masse volumique de l'eau liquide :  $\mu_\ell = 1,00 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- masse volumique de la glace :  $\mu_s = 9,15 \cdot 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c_\ell = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
- capacité thermique massique de la glace :  $c_s = 2,09 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
- chaleur latente de fusion de la glace à 0°C et sous  $P = 1,00$  bar :  $\ell_{fus} = 336,0 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
- chaleur latente de vaporisation de l'eau à 100°C et sous  $P = 1,00$  bar :  $\ell_{vap} = 2\,257 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

### Exercice 2 - Isothermes d'Andrews.

La figure représente un ensemble de courbes expérimentales, appelées isothermes d'ANDREWS, représentant la pression  $P$  d'une mole d'un fluide en fonction du volume  $V_m$  occupé, pour différentes températures.



1. Déterminer les coordonnées  $(P_C, V_{C,m})$  du point critique  $C$ .

2. Préciser l'état physique du fluide et calculer les titres molaires  $x_v$  et  $x_\ell$  de la vapeur et du liquide pour :

2.1.  $V_m = 0,6 \text{ L}$  et  $\theta = 110^\circ\text{C}$

2.2.  $P = 110 \text{ bars}$  et  $\theta = 200^\circ\text{C}$

2.3.  $V_m = 0,2 \text{ L}$  et  $\theta = 125^\circ\text{C}$

3. Que vaut le volume molaire de la vapeur saturante sèche à la pression de 40 bars ?

### Exercice 3 - Transformation d'un système diphasé.

On introduit dans un calorimètre aux parois calorifugées et de capacité thermique négligeable une masse  $m = 1,0 \text{ kg}$  d'eau liquide initialement à 20°C. On y ajoute 0,50 kg de glace à 0°C. On suppose que la transformation a lieu à pression constante  $P = 1,0$  bar.

Déterminer la composition et la température finale.

Données numériques :

- capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c_\ell = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
- enthalpie massique de fusion de l'eau à 0°C :  $\Delta h_{fus} = 3,3 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Exercice 4 - Transformation d'un système diphasé.

On donne le tableau de données thermodynamiques suivant, relatif à l'eau :

	$\theta = 80^\circ\text{C}$	$\theta = 115^\circ\text{C}$
$P_{sat}$ ( $10^3$ Pa)	47,39	169,1
$v_\ell$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$1,029 \cdot 10^{-3}$	$1,056 \cdot 10^{-3}$
$v_v$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3,407	1,037

	$\theta = 80^\circ\text{C}$	$\theta = 115^\circ\text{C}$
$h_\ell$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	334,9	482,5
$h_v$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	2 644	2 699
$s_\ell$ ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1,075	1,473
$s_v$ ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	7,612	7,183

Un récipient indilatable de volume  $V = 1,00 \text{ m}^3$  contient une masse  $m = 1,00 \text{ kg}$  d'eau à la température  $\theta_1 = 80^\circ\text{C}$ .

1. Justifier le fait que le système est diphasé.
2. Calculer les masses de liquide  $m_{liq}$  et de vapeur  $m_{vap}$  en équilibre.  
On met le récipient en contact avec un thermostat à la température  $\theta_2 = 115^\circ\text{C}$ .
3. Quel est l'état final du système? Calculer les nouvelles masses  $m'_{liq}$  et  $m'_{vap}$ .
4. Calculer le transfert thermique  $Q$  algébriquement reçu par le système au cours de la transformation.
5. Calculer l'entropie créée  $S^{crée}$  au cours de la transformation.

#### Exercice 5 - Compression isotherme en diagramme de Clapeyron ( $P, v$ ).

On étudie les transformations thermodynamiques d'un gramme d'eau.

Dans l'état initial  $A$ , le volume est de  $0,1 \text{ m}^3$ , la température est de  $27^\circ\text{C}$ .

On admet que lorsqu'il existe de l'eau liquide dans le mélange liquide-vapeur, son volume peut être négligé. On suppose de plus que la vapeur d'eau, sèche, se comporte comme un gaz parfait.

On effectue une compression isotherme réversible,  $AB$ , telle que le volume final, en l'état  $B$  soit de  $0,01 \text{ m}^3$ .

1. Préciser l'état physique de l'eau dans l'état  $A$  et dans l'état  $B$  (on donnera les nombres de moles et les masses).
2. Calculer le travail mécanique au cours de la transformation  $AB$ .
3. Calculer le transfert thermique algébriquement reçu par le système ainsi que la variation d'énergie interne du système.
4. Quelle est la variation d'entropie du système?

Données numériques :

- constante des gaz parfaits :  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
- masse molaire de l'eau :  $M = 18 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
- pression de vapeur saturante de l'eau à  $27^\circ\text{C}$  :  $P_{sat}(27^\circ\text{C}) = 3\,700 \text{ Pa}$
- enthalpie massique de vaporisation de l'eau à  $27^\circ\text{C}$  :  $\Delta h_{vap}(27^\circ\text{C}) = 2,45 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$

#### Exercice 6 - Vaporisation d'une masse d'eau.

1. Une masse  $m = 1 \text{ g}$  d'eau est contenue sous forme liquide dans un cylindre thermostaté à la température  $\theta_1 = 100^\circ\text{C}$ , sous la pression  $P_0 = 1 \text{ atm}$ . Par un déplacement très lent du piston jusqu'au volume  $V_1$ , on réalise la vaporisation totale de l'eau.

On admet que lorsqu'il existe de l'eau liquide dans le mélange liquide-vapeur, son volume peut être négligé.

On suppose de plus que la vapeur d'eau sèche, se comporte comme un gaz parfait.

- 1.1. En assimilant la vapeur d'eau à un gaz parfait, déterminer et calculer le volume  $V_1$ .
- 1.2. Exprimer puis calculer le transfert thermique  $Q$  et le travail  $W$  algébriquement reçu par le système au cours de la transformation.
- 1.3. Exprimer puis calculer la variation d'entropie  $\Delta S$  du système, l'entropie échangée  $S^{échangée}$  et l'entropie créée  $S^{crée}$ .
2. On place maintenant directement la même masse  $m = 1 \text{ g}$  d'eau dans un récipient de volume  $V_1$  initialement vide, thermostaté à la température  $\theta_1 = 100^\circ\text{C}$ . Exprimer puis calculer de nouveau  $Q'$ ,  $W'$ ,  $\Delta S'$ ,  $S'^{échangée}$  et  $S'^{crée}$ .

Données numériques :

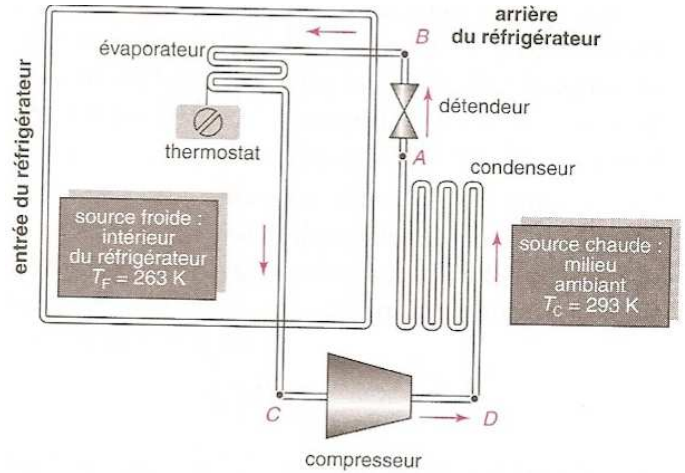
- constante des gaz parfaits :  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
- masse molaire de l'eau :  $M = 18 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
- pression de vapeur saturante de l'eau à  $100^\circ\text{C}$  :  $P_{sat}(100^\circ\text{C}) = 11 \text{ atm}$
- chaleur latente de vaporisation de l'eau à  $100^\circ\text{C}$  :  $\ell_{vap} = 225 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

**Exercice 7 - Réfrigérateur à fluide condensable.**

Le schéma de principe du réfrigérateur est représenté par le dispositif fermé suivant :

Dans ce dispositif, le fluide caloporteur est le « R134a » ou 1,1,1,2-tétrafluoroéthane  $\text{CF}_3\text{-CH}_2\text{F}$ .

Il subit quatre évolutions formant le cycle ABCDA.



Les étapes successives de ce cycle décrit par 1 kg de fluide sont les suivantes :

- $A \rightarrow B$  : le fluide qui sort du condenseur sous la forme d'un liquide saturant à la pression de  $P_A = P_2 = 18,26 \text{ bars}$  est ramené à la pression de  $P_B = P_1 = 1,64 \text{ bars}$  dans le détendeur par une détente de JOULE-KELVIN.
- $B \rightarrow C$  : le fluide se vaporise partiellement dans l'évaporateur à pression et température constantes en recevant un transfert thermique de la source froide de température  $T_F = 263 \text{ K}$ .
- $C \rightarrow D$  : le fluide subit une compression adiabatique réversible dans un compresseur calorifugé de la pression  $P_C = P_1 = 1,64 \text{ bars}$  jusqu'à la pression  $P_D = P_2 = 18,26 \text{ bars}$ . Il est entièrement à l'état vapeur en D.
- $D \rightarrow A$  : dans le condenseur, le fluide se condense totalement en fournissant la chaleur à l'extérieur (l'air de la cuisine par exemple constitue la source chaude) l'air est à la température  $T_C = 293 \text{ K}$ . La pression saturante est alors de 18,26 bars et la température du fluide est  $T_A = T_2 = 313 \text{ K}$

Les conduites reliant les différents éléments sont calorifugées et la pression qui y règne est supposée constante. Toutes les variations de vitesse du fluide sont négligées. Le régime est stationnaire.

Le tableau qui suit (à compléter) vous donne les enthalpies massiques du liquide et de la vapeur, successivement pour les couples  $(P_1, T_1)$  et  $(P_2, T_2)$

Pression de vapeur saturante (bar)	Température de changement d'état (K)	Enthalpie massique du liquide ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	Enthalpie massique de la vapeur ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	Entropie massique du liquide ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	Entropie massique de la vapeur ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
$P_1 = 1,64$	$T_1 = 258$	$h_{1L} = 178,2$	$h_{1V} = 360,4$	$s_{1L} =$	$s_{1V} = 730$
$P_2 = 18,26$	$T_2 = 313$	$h_{2L} = 264,1$	$h_{2V} = 387,7$	$s_{2L} =$	$s_{2V} = 680$

La variation d'enthalpie massique  $h$  du fluide à la traversé d'un système (détendeur, évaporateur, compresseur ou condenseur) est donnée en régime stationnaire par la relation :

$$h_s - h_e = q + w_u$$

Cette relation constitue le premier principe de la thermodynamique « industriel » :

- $h_e$  et  $h_s$  sont les enthalpies massiques du fluide évaluées respectivement à l'entrée et à la sortie du système,
- $w_u$  représente le travail massique autre que celui des forces pressantes reçu par le fluide de la part des parties mobiles du système,
- $q$  représente le transfert thermique massique reçu par le fluide.

**1. Préliminaire**

**1.1.** Tracer l'allure du diagramme de CLAPEYRON massique (pression  $P$  en ordonnée et volumique massique  $v$  en

abscisse) pour un changement d'état en faisant apparaître les deux isothermes  $T_1 = 258 \text{ K}$  et  $T_2 = 313 \text{ K}$  ainsi que les pressions correspondantes  $P_1$  et  $P_2$ .

**1.2.** Déterminer numériquement la chaleur latente  $\ell_1$  de changement d'état {liquide  $\rightarrow$  vapeur} à la température  $T_1 = 258 \text{ K}$  et la chaleur latente  $\ell_2$  de changement d'état {liquide  $\rightarrow$  vapeur} à la température  $T_2 = 313 \text{ K}$ .

**1.3.** Préciser la relation entre les enthalpies et entropies massiques lors d'un changement d'état. Compléter le tableau donné plus haut.

**1.4.** Montrer que l'expression de l'enthalpie massique  $h(x, T)$  d'un fluide diphasé (liquide, vapeur) en fonction de l'enthalpie massique de la phase liquide  $h_L(T)$ , de l'enthalpie massique de la phase vapeur  $h_V(T)$  ainsi que du titre massique en vapeur  $x$  s'écrit :

$$h(x, T) = h_L(T) + x [h_V(T) - h_L(T)]$$

**1.5.** Établir l'expression de l'entropie massique  $s(x, T)$  d'un fluide diphasé (liquide, vapeur) en fonction de l'entropie massique de la phase liquide  $s_L(T)$ , de l'entropie massique de la phase vapeur  $s_V(T)$  ainsi que du titre massique en vapeur  $x$ .

## 2. Étude du compresseur

Le fluide subit dans le compresseur une compression adiabatique et réversible.

**2.1.** A la sortie du compresseur, le fluide est une vapeur juste saturante à la température  $T_2 = 313 \text{ K}$ . En déduire le titre massique en vapeur  $x_C$  au début de la compression à la température  $T_1 = 258 \text{ K}$ .

**2.2.** Préciser l'expression de l'enthalpie massique au début et à la fin de la compression.

**2.3.** Calculer littéralement puis numériquement le travail utile  $w_u$  fourni par le compresseur.

## 3. Étude du condenseur

Dans le condenseur, le fluide est totalement liquéfié à la température  $T_2 = 313 \text{ K}$  et à la pression  $P_2 = 18,26 \text{ bars}$ .

**3.1.** Calculer littéralement et numériquement le transfert thermique  $q_C$  reçu de la part de l'air ambiant, de température  $T_C = 293 \text{ K}$ . Justifier son signe.

**3.2.** Calculer littéralement puis numériquement la variation d'entropie, l'entropie échangée et l'entropie créée lors de la condensation.

## 4. Étude du détenteur

Dans un détenteur parfaitement calorifugé et ne comportant pas de pièce mobile, le fluide subit une détente de JOULE-KELVIN jusqu'à la pression  $P_1$ , détente au cours de laquelle une partie du fluide se vaporise.

**4.1.** Justifier qualitativement le caractère isenthalpique de la détente.

**4.2.** En déduire le titre massique en vapeur  $x_B$  à la fin de la détente à la température  $T_1 = 258 \text{ K}$ .

**4.3.** Calculer l'entropie créée dans le détenteur.

## 5. Étude de l'évaporateur

**5.1.** Calculer littéralement et numériquement le transfert thermique  $q_F$  reçu de la part de la chambre froide, de température  $T_F = 263 \text{ K}$ . Justifier son signe.

**5.2.** Calculer littéralement puis numériquement la variation d'entropie, l'entropie échangée et l'entropie créée lors de l'évaporation.

## 6. Bilan

**6.1.** Tracer le cycle dans le diagramme de CLAPEYRON.

**6.2.** Définir l'efficacité d'un réfrigérateur. Calculer numériquement cette efficacité.

**6.3.** Établir l'expression de l'efficacité théorique maximale d'un réfrigérateur en fonction des températures  $T_1 = 258 \text{ K}$  et  $T_2 = 313 \text{ K}$ . Comparer cette efficacité à celle précédemment calculée. Conclure.

**6.4.** Calculer l'entropie créée sur un cycle.

**6.5.** Justifier le choix des valeurs  $T_1 = 258 \text{ K}$  et  $T_2 = 313 \text{ K}$  pour ce cycle.