

T4 – CHANGEMENTS D'ETAT

Travaux Dirigés

Exercice 1 : Vapeur sèche ou saturante

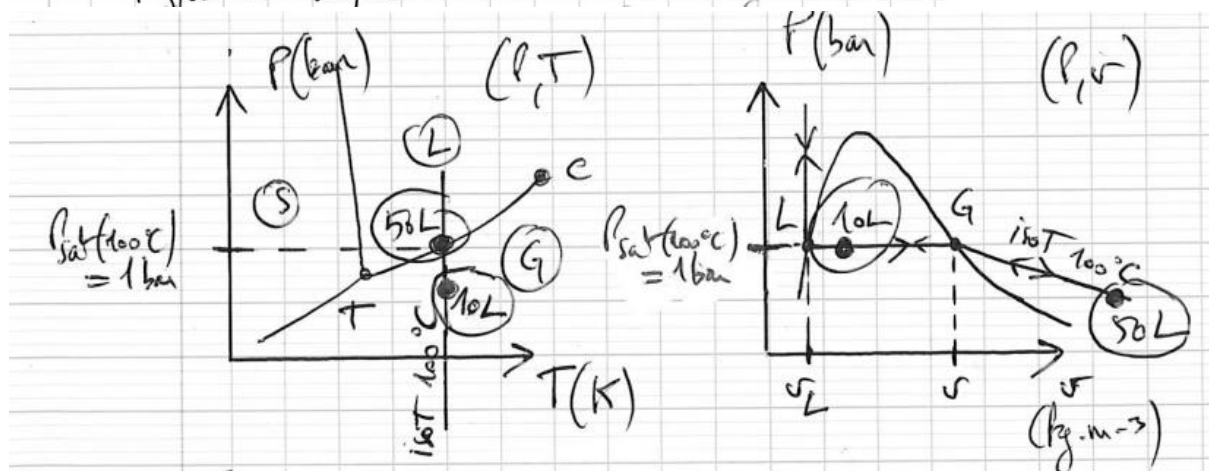
On injecte une mole d'eau dans des récipients initialement vides de volumes respectifs $V_1 = 10$ L puis $V_2 = 50$ L. Ces récipients sont thermostatés et maintenus à la température $\theta = 100^\circ\text{C}$ telle que $P_{\text{sat}}(T) = 1$ bar.

Décrire l'état final du système dans chacun des deux cas étudiés.

Rép. : 1) $x_{\text{vap}} = 32\%$ 2) $P = 0,62$ bar

1) Hypothèse : vapeur saturante.
 $V_{\text{vap}} \leq V_{\text{tot}} \quad (+) \quad \text{Vapeur considérée comme Gf.}$
 $\Rightarrow P_{\text{sat}} \cdot V_{\text{tot}} = n_{\text{vap}} \cdot RT$
 $\Rightarrow n_{\text{vap}} = \frac{P_{\text{sat}} \cdot V_{\text{tot}}}{RT} = \frac{1 \cdot 10^5 \times 10 \cdot 10^{-3}}{8,31 \times (100 + 273)}$
 $= 0,32 \text{ mol} < n_{\text{tot}}$
 Hypothèse vérifiée : $x_{\text{vap}} = 0,32$

2) Même hypothèse : vapeur saturante.
 $\Rightarrow n_{\text{vap}} = 1,6 \text{ mol} > n_{\text{tot}}$
 Hypothèse non vérifiée.
 Hypothèse : vapeur sèche.
 $n_{\text{vap}} = n_{\text{tot}}$
 $P \cdot V_{\text{tot}} = n_{\text{tot}} \cdot RT$
 $\Rightarrow P = \frac{n_{\text{tot}} \cdot RT}{V_{\text{tot}}} = \frac{1 \times 8,31 \times (100 + 273)}{50 \cdot 10^{-3}}$
 $= 62 \cdot 10^3 \text{ Pa} = 0,62 \text{ bar}$
 $< P_{\text{sat}}$
 Hypothèse vérifiée



Exercice 2 : Vaporisation d'un liquide dans le vide

Un récipient, initialement vide, de volume V , est plongé dans un thermostat à 373 K.

a) On introduit 1 g d'eau liquide dans le récipient. Calculer V minimal pour que toute l'eau soit sous forme vapeur.

b) On prend $V = 1$ L. Déterminer la fraction massique de la vapeur.

On donne $P_s(373 \text{ K}) = 1,013 \text{ bars}$ et $M(\text{eau}) = 18 \text{ g/mol}$.

Rép : $V_{\min} = 1,7 \text{ L}$ $x = 59 \%$

a) Hypothèse Vapeur sèche valide si $P \leq P_{\text{SAT}}$

$$P_s V \geq nRT = \frac{m}{M} RT = \frac{mRT}{M P_s}$$

$$V \geq \frac{mRT}{P_s} = \frac{10^{-3} \times 8,31 \times 373}{18 \cdot 10^{-3} \times 1,013 \cdot 10^5}$$

$$V \geq 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = \underline{1,7 \text{ L}}$$

b) $P_{\text{SAT}} \cdot V_{\text{TOT}} = n_{\text{VAP}} RT$

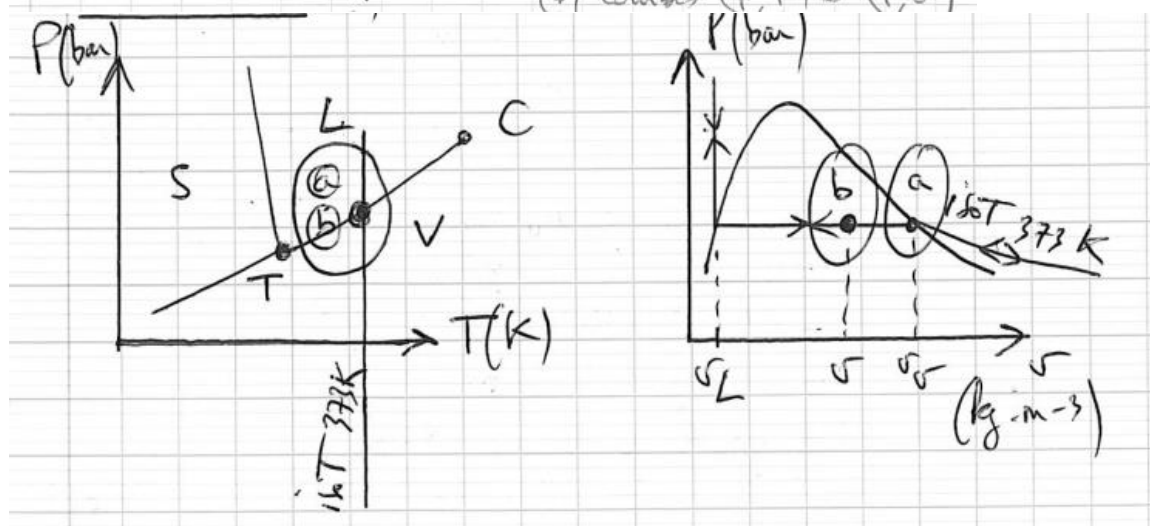
$$\Rightarrow n_{\text{VAP}} = \frac{P_{\text{SAT}} \cdot V_{\text{TOT}}}{RT} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \times 1 \cdot 10^{-3}}{8,31 \times 373}$$

$$= 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ mol}$$

$$x_{\text{VAP}} = \frac{n_{\text{VAP}}}{n_{\text{TOT}}} = \frac{n_{\text{VAP}}}{\frac{m}{M}} = \frac{n_{\text{VAP}} \times M}{m}$$

$$= \frac{3,3 \cdot 10^{-2} \times 18}{1} = \underline{0,59}$$

(*) couples (P, T) et (P, V)



Exercice 3 : Enthalpies de transition de phase

- 1) Quelle est la chaleur libérée par la solidification de 200 g d'eau liquide au cours d'une transformation isobare à 0°C ?
- 2) Quelle élévation de température subirait 1 kg d'eau liquide initialement à 10°C si on apportait (à pression constante) un transfert thermique égal à celui qui permettrait la fusion d'1 kg de glace ?
- 3) Quelle est l'énergie nécessaire pour, à pression atmosphérique faire passer un kilogramme d'eau de l'état liquide à l'état vapeur à 100°C ?

Données :

Enthalpie de fusion ou chaleur latente de fusion de l'eau à 0°C (sous 1 atm) :

$$\Delta_{fus}h(0^\circ\text{C}) = l_{fus}(0^\circ\text{C}) = 333 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Enthalpie de vaporisation ou chaleur latente de vaporisation de l'eau à 100°C (sous 1 atm) :

$$\Delta_{vap}h(100^\circ\text{C}) = l_{vap}(100^\circ\text{C}) = 2,26 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Capacité thermique massique de l'eau liquide :

$$c_0 = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Rép. : 3) $Q_1 = 66.6 \text{ kJ}$; $T_2 = 90^\circ\text{C}$; $Q_3 = 2,26 \text{ MJ}$.

Exercice 3 : Enthalpies de transition de phase

1) $Q_{libérée} = -Q_{reçue} = -\Delta H_{reçue} = -m \cdot \Delta_{sol}h(0^\circ\text{C})$
 $= -(-m \cdot \Delta_{fus}h(0^\circ\text{C}))$
 $= m \cdot \Delta_{fus}h(0^\circ\text{C})$
 $= 200 \cdot 10^{-3} \cdot 333$
 $= 66,6 \cdot 10^3 \text{ J} = \underline{66,6 \text{ kJ}}$

2) Système : Eau liquide.
 $\Delta H_{glace} = Q_p \text{ car manobare}$
 $= m \cdot \Delta_{fus}h(0^\circ\text{C})$
 $\Delta H_{liquide} = m \cdot \Delta_{fus}h(0^\circ\text{C}) = m \cdot c_0 \cdot (T_f - T_i)$
Donc :
 $T_f = T_i + \frac{\Delta_{fus}h(0^\circ\text{C})}{c_0}$
 $T_f = 10 + \frac{333}{4,18} \rightarrow \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
 $T_f = 90^\circ\text{C}$

3) $\Delta H = Q_p = m \cdot \Delta_{vap}h(100^\circ\text{C})$
 $= \underline{2,26 \text{ MJ}}$

Exercice 4 : Variations d'enthalpie

Une masse $m = 100 \text{ g}$ d'eau passe de l'état solide à -10°C à l'état liquide à $+10^\circ\text{C}$ sous une pression de 1 atm .

Calculer la quantité de chaleur nécessaire pour réaliser cette transformation.

Données :

Chaleur latente de fusion de l'eau : $l_f = 334 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ à 0°C sous 1 atm

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_l = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

Capacité thermique massique de l'eau solide : $c_s = 2,1 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

Rép. : $Q = 39,7 \text{ kJ}$

$$\begin{aligned} \Delta H = Q_p &= m \cdot l_f + m \cdot c_s \cdot \Delta T_1 + m \cdot c_l \cdot \Delta T_2 \\ &= m \cdot (l_f + c_s \cdot \Delta T_1 + c_l \cdot \Delta T_2) \\ &= 0,100 \text{ kg} \times (334 + 2,1 \times 10 + 4,2 \times 10) \cdot 10^3 \\ &= \underline{39,7 \text{ kJ}} \end{aligned}$$

Exercice 5 : État d'un système déterminé à partir d'un extrait de table

Extrait d'une table donnant les grandeurs massiques pour une vapeur d'eau saturante :

Vapeur d'eau saturante

$$P = 10 \text{ bar}$$

$$\theta = 179,86^\circ\text{C}$$

Volume massique		Enthalpie massique	
liquide	vapeur	liquide	vapeur
$v_l (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	$v_v (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	$h_l (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$h_v (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
$1,127 \cdot 10^{-3}$	0,1947	761,2	2772

Un ballon de $10,0 \text{ m}^3$ contient 169 kg d'eau sous $10,0 \text{ bar}$.

Quel est l'état de l'eau ? On précisera sa pression et sa température, son titre en vapeur et son enthalpie totale.

Exercice 5: Etat d'un système déterminé à partir d'un extrait de table.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{10}{169} = 59,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\Rightarrow v_L < v < v_g$$

$\Rightarrow$ Mélange diphasique liquide-vapeur

$$\Rightarrow P = P_{\text{sat}} = 10 \text{ bars}$$

$$T = T_{\text{sat}} = 179,86^\circ \text{C}$$

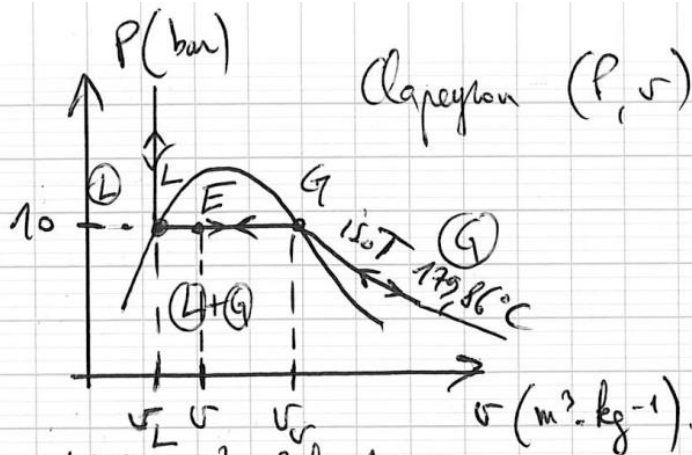
$$x = \frac{h - h_L}{h_g - h_L} \quad \dots \quad h \text{ non connue}$$

(ou)

$$(*) \quad x = \frac{v - v_L}{v_g - v_L} = \frac{59,2 \cdot 10^{-3} - 1,127 \cdot 10^{-3}}{0,1947 - 1,127 \cdot 10^{-3}} \approx \underline{0,30}$$

$$\begin{aligned} h &= x_L h_L + x_v h_v \\ &= (1-x_v) h_L + x_v h_v \\ &= (1-0,30) \times 761,2 + 0,30 \times 2772 \\ &= 1364 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H &= m \cdot h = 169 \times 1364 \\ &= 230 \cdot 10^3 \text{ kJ} = \underline{230 \text{ MJ}} \end{aligned}$$



$$v_L = 1,127 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$v_g = 0,1947 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$v = 59,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} = 0,059 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Exercice 6 : Recherche de l'état final d'un système

- 1) On plonge dans 150 g d'eau liquide à 100°C contenue dans un calorimètre un bloc de glace de 40 g à -40 °C. Quel est l'état du système à l'équilibre (composition et température) ?
- 2) Même question avec 150 g de glace.

Données : Chaleur latente massique de l'eau liquide : $c = 4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$; celle de l'eau solide est supposée très proche de celle de l'eau liquide.

Chaleur latente de fusion à 0°C : $L_f = 335 \text{ J.g}^{-1}$. La pression est constante et vaut 1 bar.

Rép. : 1) eau liquide à $T_f = 53,6 \text{ °C}$ 2) mélange eau liquide / glace à 0°C, avec **262 g** d'eau liquide.

Exercice 6 : Recherche de l'état final d'un système

1) Hypothèse 1: état final = Eau liquide.

T_f inconnue

⊕ Grande thermique calorimétrique négligée.

$L_f = 335 \text{ J.g}^{-1} = 335 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Système = Eau liquide m_1 ⊕ glace m_2

$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 = Q_p = 0$

avec : $\Delta H_1 = m_l \cdot c_l (T_f - T_{i1}) \rightarrow$ refroidissement eau

$\Delta H_2 = m_g \cdot c_g (0^\circ\text{C} - T_{i2}) + m_g \cdot L_f$

$+ m_g \cdot c_l (T_f - 0^\circ\text{C})$

Rechauffage glace - Rechauffage glace fondue - Fonte glace - 3

Avec : $c_l \approx c_g$

$\Delta H_2 \approx m_g \cdot c_l (T_f - T_{i2}) + m_g \cdot L_f$

Où :

$m_l \cdot c_l (T_f - T_{i1}) + m_g \cdot c_l (T_f - T_{i2}) + m_g \cdot L_f = 0$

$\Leftrightarrow c_l (m_l + m_g) T_f = -m_g \cdot L_f + m_l \cdot c_l \cdot T_{i1} + m_g \cdot c_l \cdot T_{i2}$

$T_f = \frac{-m_g \cdot L_f + m_l \cdot c_l \cdot T_{i1} + m_g \cdot c_l \cdot T_{i2}}{(m_l + m_g) c_l}$

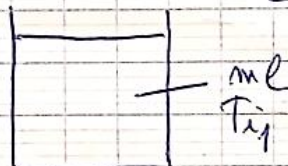
$T_f = \frac{-40 \times 335 + 150 \cdot 4,18 \cdot (100 + 273) + 40 \cdot 4,18 \cdot (-40 + 273)}{(150 + 40) \cdot 4,18}$

$T_f = 326,6 \text{ K} = 53,6 \text{ °C} \quad (*)$

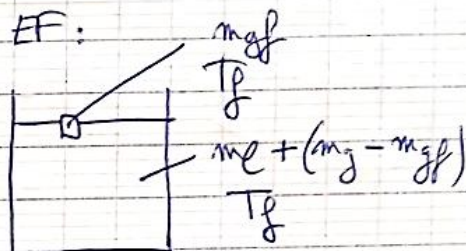
1) Hypothèse 2 : Mélange liquide + glace
(le glaçon n'a pas entièrement fondu).
 $\Rightarrow T_f = T_{\text{fusion}} = 0^\circ\text{C}$ car équilibre L+S

$m_g = 40\text{g}$ Inconnue = m_{gf} (masse de glace finale).

ET: $\begin{cases} m_g \\ T_{i2} \end{cases}$



EF:



Eau liquide de masse m_l :

$$\Delta H_1 = m_l \cdot c_l \cdot (T_f - T_{i1}) \rightarrow \text{Refroidissement eau.}$$

Glaçon de masse m_g :

$$\Delta H_2 = m_g \cdot c_g \cdot (0^\circ\text{C} - T_{i2}) \rightarrow \text{Réchauffage glaçon} \\ + (m_g - m_{gf}) \cdot L_f \rightarrow \text{Fente partie du glaçon}$$

$$\Delta H_1 + \Delta H_2 = 0$$

$$m_l \cdot c_l \cdot (T_f - T_{i1}) + m_g \cdot c_g \cdot (0^\circ\text{C} - T_{i2}) + (m_g - m_{gf}) \cdot L_f = 0$$

$$m_l \cdot c_l \cdot (T_f - T_{i1}) + m_g \cdot c_g \cdot (0^\circ\text{C} - T_{i2}) + m_g \cdot L_f = m_{gf} \cdot L_f$$

d'où:

$$m_{gf} = \frac{m_l \cdot c_l \cdot (T_f - T_{i1}) + m_g \cdot c_g \cdot (0^\circ\text{C} - T_{i2})}{L_f} + m_g$$

$$m_{gf} = \frac{150 \times 4,18 \times (0 - 100) + 40 \times 4,18 \times (0 - (-40))}{335} + 40$$

$$= -167 + 40 = -127\text{g impossible}$$

2) En faisant la même hypothèse 1 (Etat final = Eau liquide)
 $T_f = 262 \text{ K} = -10^\circ\text{C}$ Impossible

2) Hypothèse 2: Mélange liquide + glace

$$\begin{aligned} m_g &= 150 \text{ g} \\ m_{gf} &= \frac{150 \times 4,18 \times (0 - 100) + 150 \times 4,18 \times (0 - (-40))}{335} + 150 \\ &= \underline{38 \text{ g}} > 0 \quad \text{Possible} \\ &\quad \text{Hypothèse validée} \end{aligned}$$

D'où :

$$\begin{aligned} \text{Masse d'eau finale} &= (m_e + m_g - m_{gf}) \\ &= 150 + 150 - 38 \\ &= \underline{262 \text{ g}} \end{aligned}$$

Exercice 7 : Mesure de l'enthalpie de vaporisation de l'eau

Un récipient calorifugé (du type bouteille isolante) contenant une masse m d'eau distillée est placé sur une balance monoplateau électronique.

Un thermoplongeur (résistance chauffante), supporté par une potence, plonge dans l'eau.

Il est alimenté par une alimentation continue stabilisée ; un voltmètre et un ampèremètre permettent la mesure de la tension U aux bornes du thermoplongeur et de l'intensité I qui le traverse. On dispose par ailleurs d'un chronomètre.

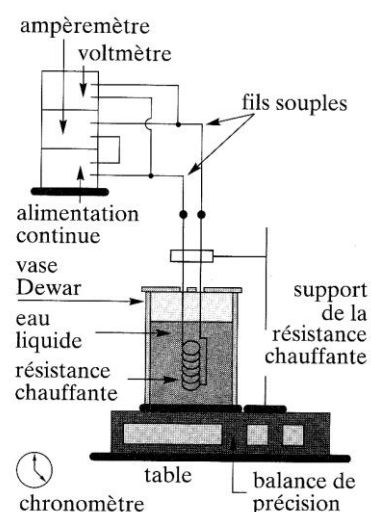
On alimente le thermoplongeur et on règle U pour avoir une ébullition régulière et lente de l'eau.

Lorsque l'on déclenche le chronomètre, la balance indique $m' = 220,12$ g. On arrête le chronomètre lorsque la balance indique $m'' = m' - 3,00$ g, et on lit le temps t écoulé.

a) Avec $U_1 = 6,00$ V et $I_1 = 2,083$ A, le temps $t_1 = 10$ min 00 s. Calculer la chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau, $L_{v,m}$. On rappelle que $M_{H_2O} = 18$ g.mol⁻¹.

b) La valeur tabulée étant voisine de 40 kJ.mol⁻¹, on décide de prendre en compte les fuites thermiques.

On réalise une seconde expérience, avec $U_2 = 9,00$ V et $I_2 = 2,00$ A ; $t_2 = 6$ min 44 s pour la même différence de masse $m'' - m'$. Calculer la chaleur latente en supposant que la puissance de fuite, P , est constante.



Rép. : 1) $L_{v,m} = 45,0$ kJ.mol⁻¹ 2) $L_{v,m} = 40,7$ kJ.mol⁻¹

Exercice 7 : Mesure de l'enthalpie de vaporisation de l'eau.

a) Système = Eau supposée à T_{vap} tout le temps de l'expérience.

$$\Delta H_1 = (m'' - m') L_{vm} = U_1 I_1 t_1 (= Q_p)$$

$$\Delta H_1 = \frac{m'' - m'}{M} L_{vm} = U_1 I_1 t_1$$

$$\text{d'où : } L_{vm} = \frac{M U_1 I_1 t_1}{m'' - m'} = \frac{18 \times 6 \times 2,083 \times 10 \times 60}{3}$$

$$= 45 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

$$\text{b) } \Delta H_1 = (m'' - m') L_{vm} = (U_1 I_1 - P) t_1$$

$$\Delta H_2 = (m'' - m') L_{vm} = (U_2 I_2 - P) t_2$$

d'où :

$$\Delta H_1 = \Delta H_2$$

$$(U_1 I_1 - P) t_1 = (U_2 I_2 - P) t_2$$

$$P = \frac{U_1 I_1 t_1 - U_2 I_2 t_2}{t_1 - t_2} = 1,07 \text{ W}$$

d'où :

$$L_{vm} = \frac{(U_1 I_1 - P) t_1 M}{m'' - m'} = 41,1 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

Exercice 8 : Détente isenthalpique

Etudions la détente dite de **Joule-Kelvin** du fluide réfrigérant R112 (fréon 12) dans une machine frigorifique : cette détente a lieu dans un système calorifugé (on considèrera donc que le système subit une transformation **adiabatique**), dans des conditions telles que la détente est **isenthalpique**.

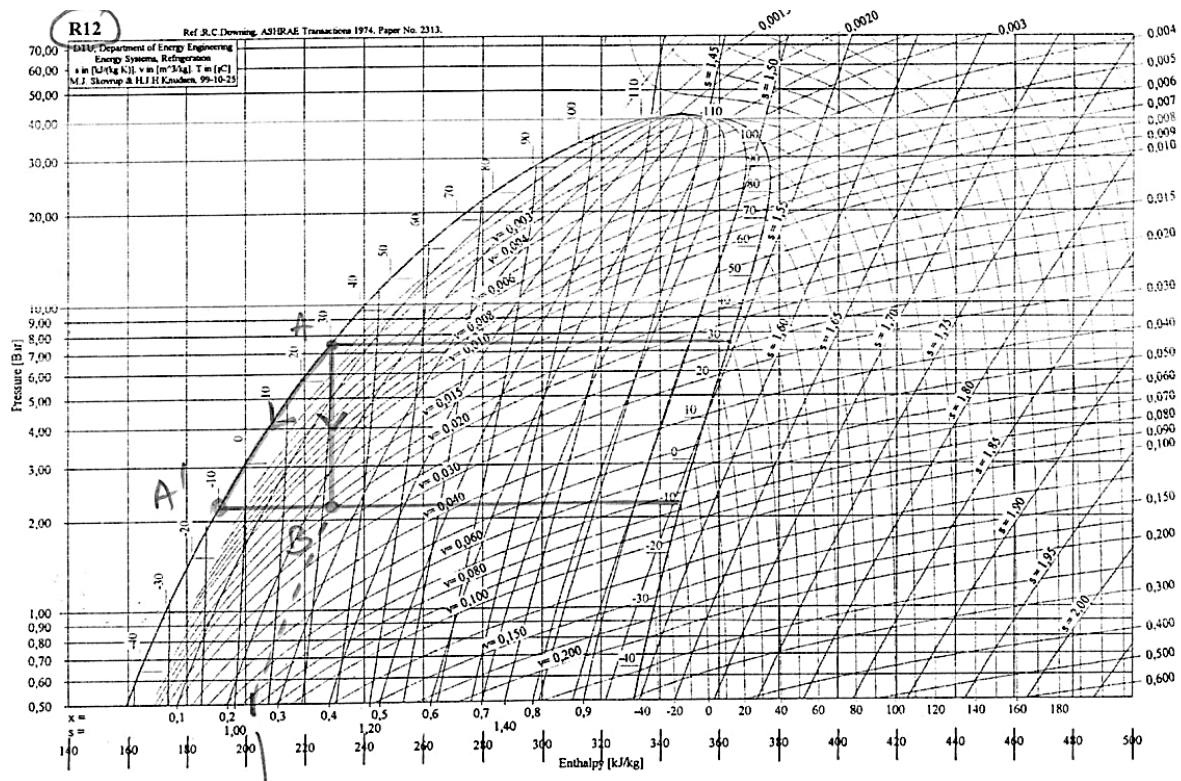
Nous allons étudier la détente $A \rightarrow B$, avec A liquide saturant à $T_A = 303 \text{ K}$, B mélange diphasique à $T_B = 263 \text{ K}$, (titre en vapeur x_V).

Déterminer les caractéristiques de l'état final, ainsi que l'entropie créée au cours de cette transformation.

Cette étude sera faite à l'aide des 3 méthodes ci-dessous.

- 1) Utilisation du diagramme des frigoristes (cf. **diagramme en annexe 2**).
- 2) Utilisation des tables thermodynamiques (cf. données ci-dessous).
- 3) Utilisation des données thermodynamiques restreintes : $T_A = 303 \text{ K}$, $P_A = P^*(T_A) = 7,4 \text{ bars}$, $x_{VA} = 0$; $T_B = 263 \text{ K}$, $P_B = P^*(T_B) = 2,2 \text{ bars}$; $C_{liq, \text{fréon}} = \text{cte} = 960 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$; $\Delta_{vap}h(T_B) = 158 \text{ kJ.kg}^{-1}$

1)



1) Voir diagramme des frigoristes
 $\Rightarrow x_A \approx 0,25$

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m³/kg]		Density [kg/m³]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K·kg]		Temp °C
		Liquid v _f	Vapour v _g	Liquid d _f	Vapour d _g	Liquid h _f	Latent h _{fg}	Vapour h _g	Liquid s _f	Vapour s _g	
-20	150.7	0.0007	0.1098	1458.0	9.109	181.6	162.1	343.7	0.9305	1.5710	-20
-19	156.7	0.0007	0.1059	1455.0	9.446	182.5	161.6	344.1	0.9341	1.5700	-19
-18	162.6	0.0007	0.1021	1452.0	9.792	183.4	161.2	344.6	0.9376	1.5690	-18
-17	169.1	0.0007	0.0986	1449.0	10.150	184.3	160.8	345.1	0.9412	1.5680	-17
-16	175.6	0.0007	0.0951	1446.0	10.510	185.2	160.3	345.5	0.9447	1.5680	-16
-15	182.3	0.0007	0.0918	1443.0	10.890	186.1	159.9	346.0	0.9482	1.5670	-15
-14	189.2	0.0007	0.0887	1440.0	11.270	187.1	159.3	346.4	0.9517	1.5670	-14
-13	196.3	0.0007	0.0857	1437.0	11.670	188.0	158.9	346.9	0.9552	1.5660	-13
-12	203.6	0.0007	0.0828	1434.0	12.080	188.9	158.5	347.4	0.9587	1.5660	-12
-11	211.1	0.0007	0.0800	1431.0	12.600	189.8	158.0	347.8	0.9622	1.5660	-11
-10	218.8	0.0007	0.0774	1428.0	13.020	190.7	157.6	348.3	0.9656	1.5640	-10
-9	226.7	0.0007	0.0749	1425.0	13.370	191.6	157.1	348.7	0.9691	1.5640	-9
-8	234.8	0.0007	0.0724	1421.0	13.820	192.6	156.6	349.2	0.9726	1.5630	-8
-7	243.2	0.0007	0.0700	1418.0	14.280	193.5	156.2	349.7	0.9760	1.5630	-7
-6	251.8	0.0007	0.0678	1415.0	14.760	194.4	155.7	350.1	0.9795	1.5620	-6
-5	260.6	0.0007	0.0656	1412.0	15.240	195.3	155.3	350.6	0.9829	1.5620	-5
-4	269.6	0.0007	0.0635	1409.0	15.740	196.3	154.7	351.0	0.9863	1.5610	-4
-3	278.9	0.0007	0.0615	1406.0	16.260	197.2	154.3	351.5	0.9898	1.5610	-3
-2	288.4	0.0007	0.0596	1402.0	16.790	198.1	153.8	351.9	0.9932	1.5600	-2
-1	298.1	0.0007	0.0577	1399.0	17.320	199.1	153.3	352.4	0.9966	1.5600	-1
0	308.1	0.0007	0.0559	1396.0	17.870	200.0	152.8	352.8	1.0000	1.5590	0
1	318.4	0.0007	0.0542	1393.0	18.440	200.9	152.4	353.3	1.0030	1.5590	1
2	328.9	0.0007	0.0526	1390.0	19.020	201.9	151.8	353.7	1.0070	1.5590	2
3	339.7	0.0007	0.0510	1386.0	19.610	202.8	151.3	354.1	1.0100	1.5580	3
4	350.7	0.0007	0.0495	1383.0	20.220	203.6	150.8	354.6	1.0140	1.5580	4
5	362.0	0.0007	0.0480	1380.0	20.840	204.7	150.3	355.0	1.0170	1.5570	5
6	373.6	0.0007	0.0466	1377.0	21.480	205.7	149.7	355.4	1.0200	1.5570	6
7	385.4	0.0007	0.0452	1373.0	22.120	206.6	149.3	355.9	1.0240	1.5570	7

2)

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m³/kg]		Density [kg/m³]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K·kg]		Temp °C
		Liquid v _f	Vapour v _g	Liquid d _f	Vapour d _g	Liquid h _f	Latent h _{fg}	Vapour h _g	Liquid s _f	Vapour s _g	
8	397.6	0.0007	0.0439	1370.0	22.800	207.6	148.7	356.3	1.0270	1.5560	8
9	410.0	0.0007	0.0426	1367.0	23.480	208.5	148.2	356.7	1.0300	1.5560	9
10	422.7	0.0007	0.0414	1363.0	24.180	209.5	147.7	357.2	1.0340	1.5550	10
11	435.7	0.0007	0.0402	1360.0	24.900	210.4	147.2	357.6	1.0370	1.5550	11
12	448.9	0.0007	0.0390	1356.0	25.630	211.4	146.6	358.0	1.0400	1.5550	12
13	462.5	0.0007	0.0379	1353.0	26.380	212.3	146.2	358.5	1.0440	1.5540	13
14	476.4	0.0007	0.0368	1350.0	27.150	213.3	145.6	358.9	1.0470	1.5540	14
15	490.6	0.0007	0.0358	1346.0	27.950	214.3	145.0	359.3	1.0500	1.5540	15
16	505.1	0.0007	0.0348	1343.0	28.740	215.2	144.5	359.7	1.0540	1.5530	16
17	520.0	0.0008	0.0338	1339.0	29.560	216.2	143.9	360.1	1.0570	1.5530	17
18	535.1	0.0008	0.0329	1336.0	30.400	217.2	143.3	360.5	1.0600	1.5530	18
19	550.6	0.0008	0.0320	1332.0	31.260	218.2	142.8	361.0	1.0640	1.5520	19
20	566.4	0.0008	0.0311	1329.0	32.130	219.1	142.3	361.4	1.0670	1.5520	20
21	582.6	0.0008	0.0303	1325.0	33.030	220.1	141.7	361.8	1.0700	1.5520	21
22	599.0	0.0008	0.0295	1322.0	33.960	221.1	141.1	362.2	1.0740	1.5510	22
23	615.9	0.0008	0.0287	1318.0	34.920	222.1	140.5	362.6	1.0770	1.5510	23
24	633.0	0.0008	0.0279	1315.0	35.850	223.1	139.9	363.0	1.0800	1.5510	24
25	650.6	0.0008	0.0272	1311.0	36.820	224.1	139.3	363.4	1.0830	1.5510	25
26	668.5	0.0008	0.0264	1307.0	37.820	225.1	138.7	363.8	1.0870	1.5500	26
27	686.7	0.0008	0.0257	1304.0	38.850	226.0	138.2	364.2	1.0900	1.5500	27
28	705.3	0.0008	0.0251	1300.0	39.900	227.0	137.5	364.5	1.0930	1.5500	28
29	724.3	0.0008	0.0244	1296.0	40.970	228.0	136.9	364.9	1.0960	1.5490	29
30	743.7	0.0008	0.0238	1293.0	42.070	229.0	136.3	365.3	1.1000	1.5490	30
31	763.4	0.0008	0.0232	1289.0	43.180	230.0	135.7	365.7	1.1030	1.5490	31
32	783.5	0.0008	0.0226	1285.0	44.330	231.1	135.0	366.1	1.1060	1.5490	32
33	804.0	0.0008	0.0220	1281.0	45.490	232.1	134.3	366.4	1.1090	1.5480	33
34	824.9	0.0008	0.0214	1278.0	46.690	233.1	133.7	366.8	1.1130	1.5480	34
35	846.2	0.0008	0.0209	1274.0	47.910	234.1	133.1	367.2	1.1160	1.5480	35

2) Table

$T_A = 303 \text{ K} = 30^\circ \text{C}$ ⊕ liquide saturant
 $\Rightarrow h_f = 229,0 \text{ kJ/kg} = h_A$

Détente isenthalpique

$\Rightarrow h_B = h_A = 229,0 \text{ kJ/kg}$

⊕ mélange diphasique

$\Rightarrow h_B = (1-x_v)h_f + x_v h_g = h_A$

D'où

$h_B = h_A = h_f - x_v h_f + x_v h_g$

$h_A - h_f = x_v (h_g - h_f)$

$x_v = \frac{h_A - h_f}{h_g - h_f}$ (Règle des moments !)
 (ou $\frac{h_f - h_A}{h_f - h_g}$)

AN: $x_v = \frac{229,0 - 190,7}{368,3 - 190,7} = 0,24$

3) $\Delta h_{A \rightarrow B} = 0 = \Delta h_{A \rightarrow A'} + \Delta h_{A' \rightarrow B}$
 Car enthalpie fonction d'état.
 Avec : $A \rightarrow A'$: Détente, liquide saturant
 $A' \rightarrow B$: Vaporisation partielle à $T = T_B$.

$$\Delta h_{A \rightarrow A'} = C(T_{A'} - T_A) = C(T_B - T_A)$$

$$\Delta h_{A' \rightarrow B} = x_v \cdot \Delta_{vap} h(T_B)$$

D'où :

$$x_v \cdot \Delta_{vap} h(T_B) = C(T_A - T_B)$$

$$x_v = \frac{C(T_A - T_B)}{\Delta_{vap} h(T_B)} = \frac{960(303 - 263)}{158 \cdot 10^3} = 0,24$$

2) $\Delta s_{A \rightarrow B} = s_B - s_A$
 $= (1 - x_v) s_B^g + x_v s_B^g - s_A^g$
 $= ((1 - 0,24) \cdot 0,3656 + 0,24 \cdot 1,5640 - 1,100) \cdot 10^3$
 $= 9,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

3) $\Delta s_{A \rightarrow B} = C \cdot \ln\left(\frac{T_B}{T_A}\right) + x_v \cdot \frac{\Delta_{vap} h(T_B)}{T_B}$
 $= 960 \cdot \ln\left(\frac{263}{303}\right) + 0,24 \cdot \frac{158 \cdot 10^3}{263}$
 $= 8,2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

Exercice 9 : Combustion de l'éthanol

La combustion de l'éthanol correspond à la réaction totale entre l'éthanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(l)}$ et le dioxygène $\text{O}_{2(g)}$ pour former du dioxyde de carbone $\text{CO}_{2(g)}$ et de l'eau $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$.

- 1) Ecrire et équilibrer l'équation de la réaction.
- 2) Pour 1 mole d'éthanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ consommée, combien de moles des autres espèces sont-elles formées ou consommées ? Même question pour ξ moles d'éthanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ consommées.
- 3) Pour 1 mole de dioxyde de carbone CO_2 formée, combien de moles des autres espèces sont-elles formées ou consommées ?

Exercice 10 : Combustion du propane

- 1) Quelle est l'énergie dégagée par la combustion de 10 g de propane (C_3H_8) sachant l'enthalpie de réaction de combustion d'une mole de propane est $\Delta_r H = -2244 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$?
- 2) Cette énergie sert à chauffer 3 kg d'eau liquide, dont la température initiale est 15°C . Quelle est sa température finale ?

Données : Masses molaires de H et C : 1 et $12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_0 = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Rép : $Q = 510 \text{ kJ}$; Température finale de 56°C .

Exercice 11 : Réaction acido-basique

On dispose de 2 solutions à température ambiante θ_0 , toutes les deux à la même concentration $C = 1 \text{ mol.L}^{-1}$:

- une solution d'**acide chlorhydrique** $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-$

- une solution de **soude** $\text{Na}^+ + \text{HO}^-$

On mélange deux volumes égaux $V = 100 \text{ mL}$ de ces 2 solutions ; la réaction (totale) qui a lieu est :



Les ions Na^+ et Cl^- sont spectateurs, ils ne participent pas à la réaction.

- 1) Quel est le nombre n_1 de mol d'ions oxonium H_3O^+ présents dans le volume $V = 100 \text{ mL}$? dans le volume $2V$ du mélange dans le bécher ?
- 2) Quel est le nombre n_2 de mol d'ions hydroxyde HO^- dans le volume V ? dans le volume $2V$ du mélange ?
- 3) Dresser le tableau d'avancement (valeurs littérales) de la réaction. Que vaut l'avancement final ξ_∞ ?
- 4) La température initiale de l'expérience est de 19°C ; la température finale en fin de réaction est de $23,9^\circ\text{C}$.
 - a) Déterminer à l'aide des résultats expérimentaux l'enthalpie de réaction de la réaction acido-basique entre les ions oxonium et les ions hydroxyde.
 - b) Comparer à la valeur tabulée à 25°C , de $-55,8 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

Exercice 12 : Dissolution exothermique du chlorure de lithium

On dissout **totalemment** 8,5 g de chlorure de lithium $LiCl_s$ dans 150 mL d'eau initialement à 20°C, selon la réaction d'équation-bilan suivante : $LiCl_s(+H_2O) = Li^+ + Cl^- (+H_2O)$

Calculer la température finale maximale que peut atteindre la solution. On négligera la variation de volume de la solution liée à la dissolution, et on pourra considérer que la capacité thermique de l'eau n'est pas modifiée par la présence des ions Li^+ et Cl^- .

Données : masses molaires en g.mol⁻¹ : $Li = 7$; $Cl = 35,5$; enthalpie molaire de dissolution du chlorure de lithium : $\Delta_r H = -55 \text{ kJ/mol}$; capacité thermique de l'eau : $c_0 = 4,18 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.

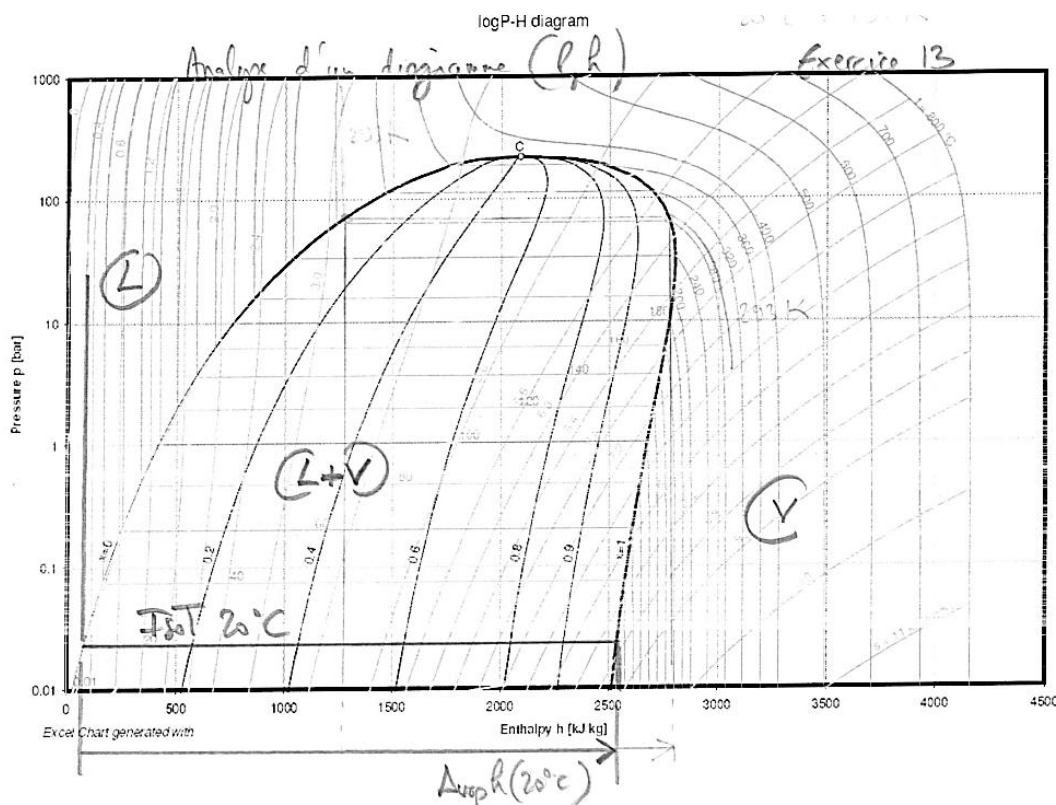
Rép. : $\theta_f = 37,5^\circ\text{C}$

Exercice 13 : Analyse d'un diagramme (P, h)

Pour l'étude des fluides condensables, l'un des diagrammes les plus utilisés est le diagramme (P, h) ou diagramme des frigoristes, représentant la pression en fonction de l'enthalpie.

La figure en **annexe 1** représente le diagramme (P, h) de l'eau.

- 1) Identifier les domaines du liquide, de la vapeur sèche, des états d'équilibre liquide-vapeur et le point critique.
- 2) Justifier la forme des isothermes.
- 3) Expliquer comment déterminer une enthalpie de vaporisation à une température T donnée ; le faire pour $T = 20^\circ\text{C}$.
- 4) Montrer que l'on peut écrire un théorème des moments avec l'enthalpie comme dans le diagramme de Clapeyron.



Exercice 13: Analyse d'un diagramme (P, h)

1. Voir diagramme (annexe 1)
2. Isotherme :
 - * Phase V : gaz parfait (Isothermes = verticales)
 $h = u + p v$ (ou) $\Delta h = c_p \cdot \Delta T$
 L'enthalpie dépend de la température, et non de la pression
 - * Phase L + V : le changement d'état (isobare) se fait à Température Constante
 $\Rightarrow$ Isobares et isothermes horizontales
 - * Phase L : l'enthalpie indépendante de la pression (Isothermes verticales) ($\Delta h = c \cdot \Delta T$)
3. Voir annexe 1 - $20^\circ\text{C} = 293\text{K}$.
 On lit : $\Delta_{\text{vap}} h(20^\circ\text{C}) \approx 2500 - 100 \approx 2400\text{ kJ/kg}$
4. Diagramme de Clapeyron : v en abscisse.
 $v = (1 - x_v) v_f + x_v \cdot v_g$
 Diagramme des fractions massiques : h en abscisse.
 $h = (1 - x_v) h_f + x_v \cdot h_g$
 $\Rightarrow x_v = \frac{h - h_f}{h_g - h_f}$ Théorème des moments

Exercice 14 : Stockage d'eau dans un ballon d'eau chaude

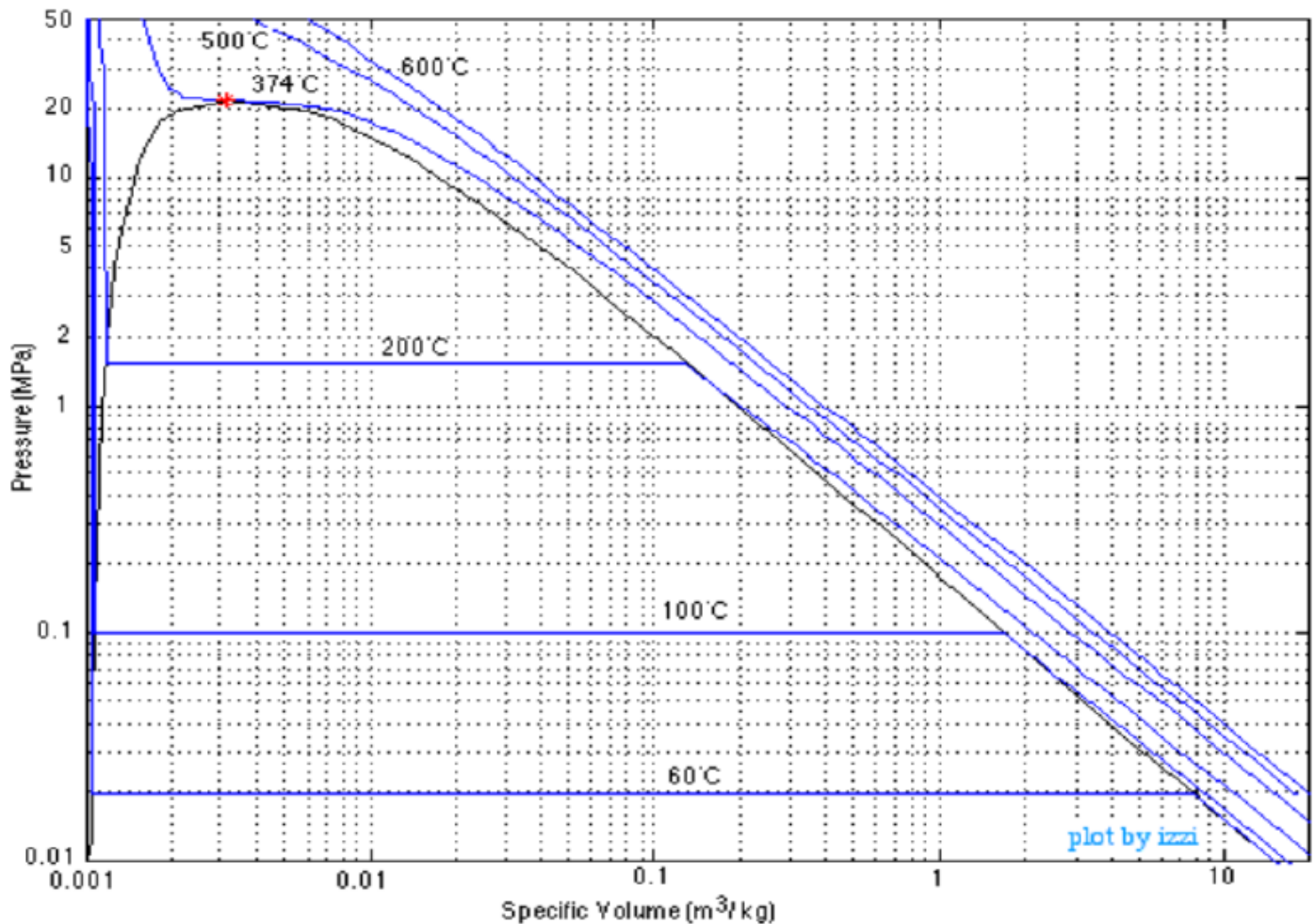


Figure 1 – Diagramme de Clapeyron de l'eau

On souhaite stocker une masse m d'eau dans un ballon d'eau chaude modélisé par une cuve fermée, indéformable et de volume $V_0 = 200L$. Pour simplifier, on suppose que la quantité d'air initialement présent est négligeable. Suite à un échauffement accidentel, l'eau maintenue à $\theta_0 = 60^\circ C$ passe à la température $\theta_1 = 380^\circ C$. La vapeur d'eau sèche est assimilée au gaz parfait de constante $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

- 1) Lorsqu'il est rempli, le ballon contient $m = m_1 = 100 \text{ kg}$ d'eau.
 - a) En utilisant le diagramme de Clapeyron fourni fig.1 ci-dessous (en échelle logarithmique), déterminer la composition initiale du mélange liquide-gaz dans le ballon à T_0 .
 - b) Sous quelle forme se trouve l'eau après l'échauffement accidentel ? Déterminer l'ordre de grandeur de la pression P_1 correspondante et commenter.
- 2) Le ballon est maintenant presque vide et contient seulement $m = m_2 = 400 \text{ g}$. Reprendre les questions précédentes et déterminer la pression P_2 à l'issue de l'échauffement.
- 3) Lorsqu'on stocke un fluide, est-il préférable que le volumique massique v soit supérieur ou inférieur au volume massique critique v_c pour éviter une explosion ?

Rép. : 1) $x_{v1} \approx 0,012 \%$

$P_1 \approx 300 \text{ bar}$

2) $x_{v2} \approx 6,24 \%$ et $P_2 \approx 6,9 \text{ bar}$

Exercice 14: Stockage d'eau dans un ballon d'eau chaude.

1) a) Etat initial: $\theta_0 = 60^\circ\text{C}$

$$m_1 = 100 \text{ kg}$$

$$V_0 = 200 \text{ L}$$

On calcule le volume massique:

$$v_1 = \frac{V_0}{m_1} = \frac{200 \cdot 10^{-3}}{100} = 200 \cdot 10^{-5} = 0,002 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Sur la courbe, et sur l'isotherme 60°C , on

$$\text{lit } v_L = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{abscisse point L})$$

$$v_V = 8 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{abscisse point V})$$

On en déduit:

$$x_{v1} = \frac{LE}{LV} \quad \Delta \text{ échelle logarithmique}$$

$$x_{v1} = \frac{v_1 - v_L}{v_V - v_L} = \frac{0,002 - 0,001}{8 - 0,001} = 0,00012 = 0,012\%$$

b) Drote verticale jusqu'à avoir isoT 380°C (point F)

$\Rightarrow$ Domaine liquide (ou supercritique)

$$\Rightarrow P_1 \approx 30 \text{ MPa} \approx 300 \text{ bars}$$

Pression très élevée = Danger

2) Même raisonnement qu'en 1):

$$v_2 = \frac{V_0}{m_2} = \frac{200 \cdot 10^{-3}}{400 \cdot 10^{-3}} = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$x_{v2} = \frac{v_2 - v_L}{v_V - v_L} = \frac{0,5 - 0,001}{8 - 0,001} = 0,062 = 6,2\%$$

graphiquement

Drote verticale $\Rightarrow$ point F

$$\Rightarrow P_2 \approx 0,4 \text{ MPa} \approx 4 \text{ bar}$$

$\Rightarrow$ Vapeur sèche

Calcul. Hypothèse: Toute la vapeur occupe le volume V_0

$$P_2 V_0 = n R \theta_1 = \frac{m}{M} R \theta_1$$

$$M = M_{\text{eau}} = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 0,018 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$P_2 = \frac{m R \theta_1}{M V_0} = \frac{0,400 \times 8,314 \times (380 + 273)}{0,018 \times 0,200} = 5,8 \text{ bar}$$

Exercice 15 : Compression isotherme d'un réfrigérant

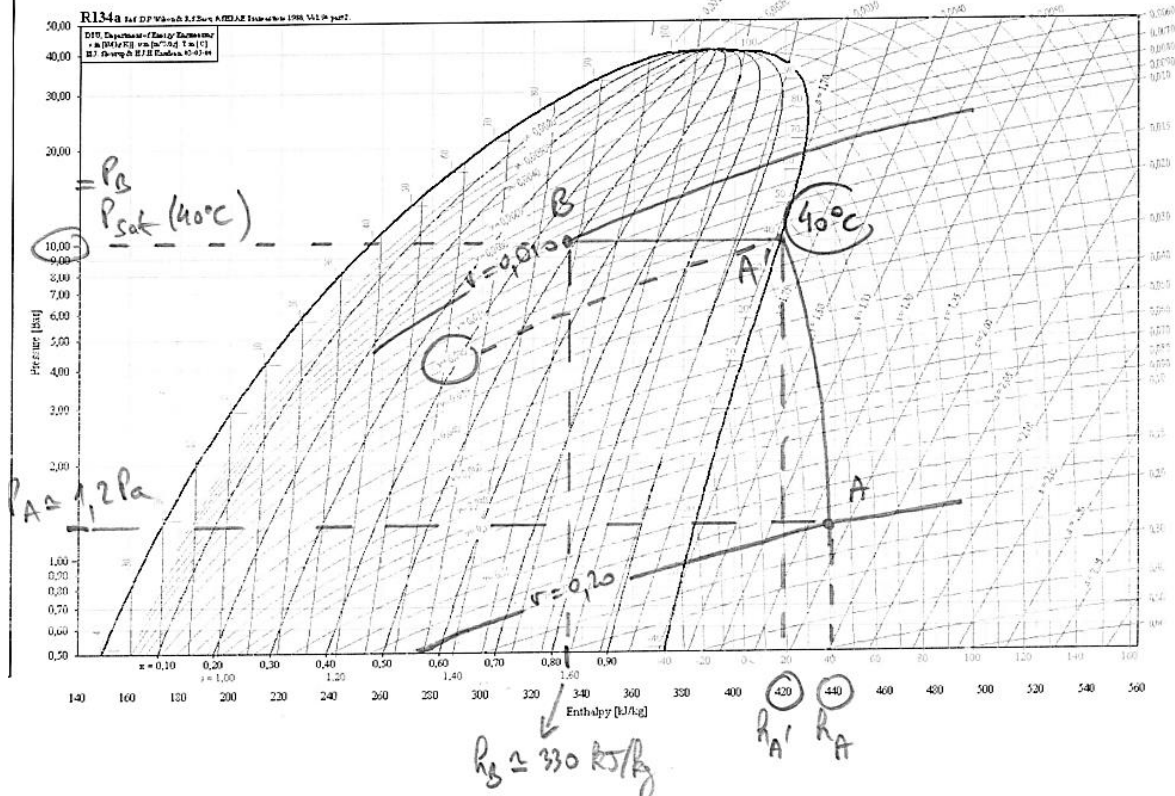
On étudie les transformations thermodynamiques d'un réfrigérant (1,1,1,2-tétrafluoroéthane ou R134a) dont on donne une partie du diagramme (P, h) en **annexe 3**.

Dans l'état initial A, le volume massique est $v_i = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$, la température est de 40°C . La masse totale de fluide, de masse molaire $M = 102 \text{ g/mol}$, est $m = 15 \text{ g}$. On effectue une compression isotherme mécaniquement réversible AB telle que le volume massique final, en B, soit $v_f = 0,01 \text{ m}^3/\text{kg}$.

- 1) Préciser l'état physique et la composition du réfrigérant dans les états A et B.
- 2) Calculer le travail mécanique au cours de la transformation AB (on pourra faire une hypothèse simplificatrice).
- 3) Calculer le transfert thermique reçu par le réfrigérant.

Rép. : 1) $x_v = 0,48$ 2) $W = 1,03 \text{ kJ}$, 3) $Q = -2,5 \text{ kJ}$

Exercice 15



- 1) A : Vapeur sèche. Voir annexe 3
- B : liquide + Vapeur.
- $x_v \approx 0.50$.

- 2) On décompose en 2 étapes :
- A $\rightarrow$ A' Compression isotherme
- A' $\rightarrow$ B Compression isotherme

$$\begin{aligned}
 W_{AA'} &= - \int P_{\text{ext}} \cdot dV \\
 &= - \int_{V_A}^{V_{A'}} P \cdot dV \quad \text{car mécaniquement réversible.} \\
 &= - \int_{V_A}^{V_{A'}} \frac{nRT_A}{V} \cdot dV \quad \text{car GP + isotherme} \\
 &= - nRT_A \ln \left(\frac{V_{A'}}{V_A} \right) \\
 &= - \frac{m}{M} RT_A \ln \left(\frac{V_{A'}}{V_A} \right)
 \end{aligned}$$

Hypothèse simplifiée.

$$\begin{aligned}
 &= -\frac{m}{M} R T_A \ln\left(\frac{v_{A'}}{v_A}\right) \\
 &= -\frac{15}{102} \times 8,31 \times (273 + 40) \times \ln\left(\frac{0,020}{0,20}\right) \\
 &= 0,88 \text{ kJ} \\
 W_{AB} &= - \int p_{ext} \cdot dV \\
 &= - \int P \cdot dV \text{ car manquement réversible} \\
 &= - P \cdot (V_B - V_{A'}) \text{ car isobare} \\
 &= - p_{sat}(40^\circ\text{C}) \cdot m \cdot (v_B - v_{A'}) \\
 &= - 10 \cdot 10^5 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot (0,010 - 0,020) \\
 &= 0,15 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

D'où :

$$\begin{aligned}
 W_{AB} &= W_{AA'} + W_{A'B} \\
 &= 0,88 + 0,15 = 1,03 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

3) 1er Principe :

$$\begin{aligned}
 \Delta U_{AB} &= W_{AB} + Q_{AB} \\
 \text{et } \Delta U_{AB} &= \Delta H_{AB} - \Delta(PV)_{AB}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta H_{AB} &= m \Delta h_{AB} \\
 &= m \cdot (h_B - h_A) = 15 \cdot 10^{-3} \cdot (330 - 440) \cdot 10^3 \\
 &= -1,65 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta(PV)_{AB} &= p_B V_B - p_A V_A \\
 &= m (p_B v_B - p_A v_A) \\
 &= 15 \cdot 10^{-3} (10 \cdot 10^5 \times 0,010 - 1,265 \times 10^5 \times 0,20) \\
 &= -0,21 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

D'où :

$$\begin{aligned}
 Q_{AB} &= \Delta H_{AB} - \Delta(PV)_{AB} - W_{AB} \\
 &= -1,65 + 0,21 - 1,03 \\
 &= -2,5 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

Exercice 16 : Résolution de problème : canette auto-réfrigérante

A l'occasion de la Coupe du Monde de Football 2002, une canette autoréfrigérante a été mise au point. Elle comprend un réservoir en acier contenant le liquide réfrigérant (une masse $m_r = 60$ g de diazote N_2) qui, lorsqu'on ouvre la canette, est libéré et subit une détente brutale. Il se vaporise alors en traversant une spirale en aluminium qui serpente à travers la boisson à refroidir.

On étudiera une canette de 33 cL, et on supposera pour simplifier qu'elle est remplie d'un liquide de capacité thermique massique très proche de l'eau ($c = 4,2$ kJ/kg).

Quelques données caractéristiques du diazote :

- Masse molaire : $M = 28$ g/mol
- Point de fusion : $-210,00$ °C ; point d'ébullition : $T_{éb} = -195,798$ °C (à pression atmosphérique).
- Enthalpie massique de vaporisation du diazote à la température $T_{éb}$: $L_v = 200$ kJ/kg,
- Capacité thermique massique du diazote gazeux : 1025 J/kg/K ; liquide : 730 J/kg/K.

Evaluer la variation de température de la boisson (en fonction du temps dont vous disposez, vous pourrez choisir un modèle plus ou moins simplifié).

Rép. : $\Delta T \approx 8$ à 9 K

Exercice 16 : Canette auto-réfrigérante

Hypothèse : la majeure partie de l'énergie est absorbée par la vaporisation de l'azote et permet le refroidissement de la canette.

Système = Azote + Boisson + canette
négligée (aucune donnée)

$\Delta H = Q_p = 0 = \Delta H_{azote} + \Delta H_{boisson} + \cancel{\Delta H_{canette}}$
monnaie adiabatique et brutale

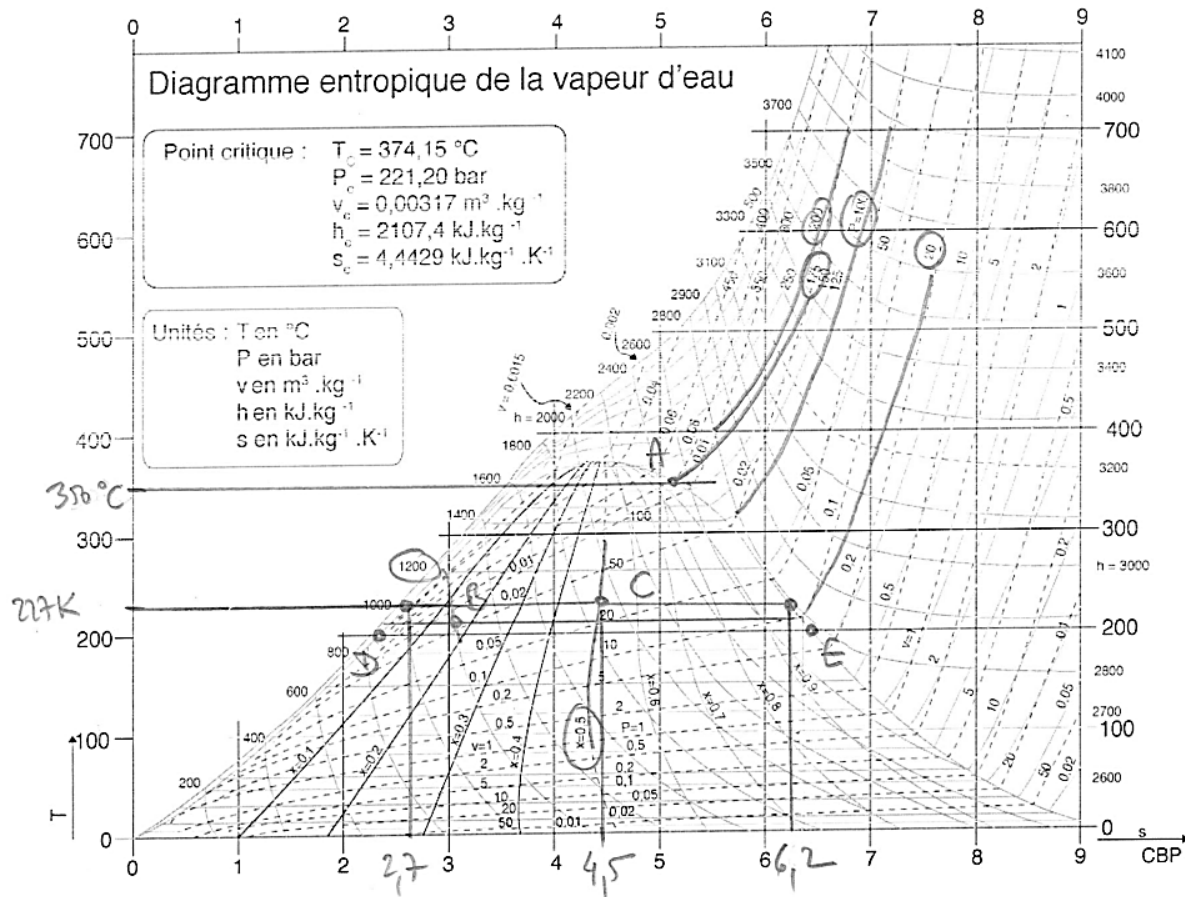
$\Delta H_{azote} \approx m_r \cdot L_v$
 $\Delta H_{boisson} = m_B \cdot c \cdot \Delta T = \rho_B \cdot V_B \cdot c \cdot \Delta T$

d'où : $m_r \cdot L_v + \rho_B \cdot V_B \cdot c \cdot \Delta T = 0$

d'où : $\Delta T = -\frac{m_r \cdot L_v}{\rho_B \cdot V_B \cdot c} = -\frac{60 \cdot 10^{-3} \times 200 \cdot 10^3}{1000 \times 0,33 \cdot 10^{-3} \cdot 4,2 \cdot 10^3}$
 $= -8,6$ K

Exercice 17 : Lecture d'un diagramme entropique pour l'eau (cf. annexe 4)

- Pour $T = 350^\circ\text{C}$, quelle est la pression de vapeur saturante ?
- Pour $P = 20 \text{ bar}$ et $h = 1200 \text{ kJ.kg}^{-1}$, quel est l'état physique de l'eau ?
- Pour $x = 50 \%$ et $T = 500 \text{ K}$, quelle est l'entropie massique du fluide ? de la phase vapeur ? de la phase liquide ?
- Quelle est la chaleur latente de vaporisation à $T = 200^\circ\text{C}$?



a. $T = 350^\circ\text{C}$
 $\Rightarrow P_{\text{vap}} = 175 \text{ bar}$

Point (A)

b. $P = 20 \text{ bar}$
 $h = 1200 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Point (B)

$\Rightarrow \text{Etat : } L + V$
 $x_v \approx 0,15$

c. $T = 500 \text{ K} \Rightarrow T = 500 - 273$
 $= 227 \text{ K}$

Point (C)

$x_v = 0,5$
 $\Rightarrow$ Entropie massique $4,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 " " vapeur $6,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 " " liquide $2,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

d. Chaleur latente de vaporisation à $T = 200^\circ\text{C}$
 $= \Delta_{\text{vap}} h (200^\circ\text{C})$

$= h_E - h_D$
 $\approx 2880 - 880 \approx 2000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Exercice 18 : Détente isentropique de vapeur d'eau dans une machine à vapeur

Etude d'une détente supposée adiabatique réversible (donc isentropique) de vapeur d'eau dans un cylindre fermé par un piston mobile. L'état initial est de la vapeur d'eau juste saturante à 485 K et l'état final est à 373 K. Déterminer les caractéristiques de l'état final de 2 manières :

- En utilisant le diagramme entropique de l'eau.
- En utilisant les tables thermodynamiques complètes (cf. ci-contre).

T	p	Liquide juste saturé $x_V = 0$			Vapeur saturante-sèche $x_V = 1$		
		v_L	h_L	s_L	v_V	h_V	s_V
K	bar	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
485	20	$1,18 \cdot 10^{-3}$	909	2,45	0,0998	2 801	6,35
373	1	$1,04 \cdot 10^{-3}$	418	1,30	1,70	2 676	7,36

Etat I : Vapeur saturante
 $T_i = 485 \text{ K} = 212^\circ \text{C}$

Etat F : $T_f = 373 \text{ K} = 100^\circ \text{C}$

a) Diagramme entropique
 Détente isentropique = verticale
 $\Rightarrow x_v \approx 0,85$

b) $T_i = 485 \text{ K}$ ⊕ vapeur saturante
 $\Rightarrow s_{vi} = 6,35 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
 Détente isenthalpique
 $\Rightarrow s_f = 6,35 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
 Avec :
 $s_f = (1 - x_v)s_{Lf} + x_v \cdot s_{vf}$
 $s_f - s_{Lf} = x_v(s_{vf} - s_{Lf})$
 $x_v = \frac{s_f - s_{Lf}}{s_{vf} - s_{Lf}}$ (théorème des moments!!)
 $x_v = \frac{6,35 - 1,30}{7,36 - 1,30} = 0,83$

Exercice 19 : Transformation d'une masse d'eau

Une quantité de vapeur d'eau saturante sèche de masse $m = 1 \text{ kg}$ maintenue initialement à la pression $p_1 = 20 \text{ bar}$ et à la température $\theta_1 = 212^\circ\text{C}$ est détendue de manière isentropique jusqu'à la pression $p_2 = 0,5 \text{ bar}$ et la température $\theta_2 = 81^\circ\text{C}$.

- Représenter la transformation dans un diagramme (T, s) .
- Déterminer à l'aide du diagramme de Mollier ci-dessous les valeurs de x_v et Δh .

Rép. : $x_v = 80 \%$; $\Delta h = -582 \text{ kJ.kg}^{-1}$

