

## T4 – CHANGEMENTS D'ÉTAT

### 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

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

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

#### 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  $0^\circ\text{C}$  ?
- 2) Quelle élévation de température subirait 1 kg d'eau liquide initialement à  $10^\circ\text{C}$  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  $100^\circ\text{C}$  ?

#### **Données :**

Enthalpie de fusion ou chaleur latente de fusion de l'eau à  $0^\circ\text{C}$  (sous 1 atm) :

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

Enthalpie de vaporisation ou chaleur latente de vaporisation de l'eau à  $100^\circ\text{C}$  (sous 1 atm) :

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

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 4 : Variations d'enthalpie**

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

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  $0^\circ\text{C}$  sous  $1 \text{ atm}$

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. :**  $Q = 39,7 \text{ kJ}$

#### **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  $169 \text{ kg}$  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 6 : Recherche de l'état final d'un système**

1) On plonge dans  $150 \text{ g}$  d'eau liquide à  $100^\circ\text{C}$  contenue dans un calorimètre un bloc de glace de  $40 \text{ g}$  à  $-40^\circ\text{C}$ . Quel est l'état du système à l'équilibre (composition et température) ?

2) Même question avec  $150 \text{ g}$  de glace.

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

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

**Rép. :** 1) eau liquide à  $T_f = 53,6^\circ\text{C}$  2) mélange eau liquide / glace à  $0^\circ\text{C}$ , avec  $112 \text{ g}$  d'eau liquide.

### 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.

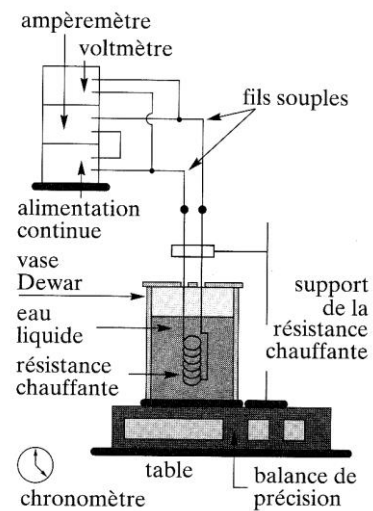
On alimente le thermoplongeur et on règle  $U$  pour avoir une ébullition régulière et lente de l'eau.

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<sup>-1</sup>.

b) La valeur tabulée étant voisine de 40 kJ.mol<sup>-1</sup>, 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<sup>-1</sup> 2)  $L_{v,m} = 40,7$  kJ.mol<sup>-1</sup>

### 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  $T_A = 303$  K, B mélange diphasique à  $T_B = 263$  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) ;

**Table 1 (continued)**  
**DuPont™ Freon® 12 Saturation Properties — Temperature Table**

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m <sup>3</sup> /kg]		Density [kg/m <sup>3</sup> ]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K-kg]		Temp °C
		Liquid v <sub>f</sub>	Vapour v <sub>g</sub>	Liquid d <sub>f</sub>	Vapour d <sub>g</sub>	Liquid H <sub>f</sub>	Latent H <sub>fg</sub>	Vapour H <sub>g</sub>	Liquid S <sub>f</sub>	Vapour S <sub>g</sub>	
-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	162.8	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	1.5690	-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	12.500	189.8	158.0	347.8	0.9622	1.5650	-11
-10	218.8	0.0007	0.0774	1428.0	12.920	190.7	157.6	348.3	0.9656	1.5640	-10
-9	226.7	0.0007	0.0748	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	16.780	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	0.0560	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	203.8	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	22.130	206.6	149.3	355.9	1.0240	1.5570	7

**Table 1 (continued)**  
**DuPont™ Freon® 12 Saturation Properties — Temperature Table**

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m <sup>3</sup> /kg]		Density [kg/m <sup>3</sup> ]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K-kg]		Temp °C
		Liquid v <sub>f</sub>	Vapour v <sub>g</sub>	Liquid d <sub>f</sub>	Vapour d <sub>g</sub>	Liquid H <sub>f</sub>	Latent H <sub>fg</sub>	Vapour H <sub>g</sub>	Liquid S <sub>f</sub>	Vapour S <sub>g</sub>	
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	27.930	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	33.950	221.1	141.1	362.2	1.0740	1.5510	22
23	615.9	0.0008	0.0287	1318.0	34.890	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	36.830	224.1	139.3	363.4	1.0830	1.5510	25
26	668.5	0.0008	0.0264	1307.0	37.830	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

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

### Exercice 9 : Combustion de l'éthanol

La combustion de l'éthanol correspond à la réaction totale entre l'éthanol  $C_2H_5OH_{(l)}$  et le dioxygène  $O_{2(g)}$  pour former du dioxyde de carbone  $CO_{2(g)}$  et de l'eau  $H_2O_{(l)}$ .

- 1) Ecrire et équilibrer l'équation de la réaction.
- 2) Pour 1 mole d'éthanol  $C_2H_5OH$  consommée, combien de moles des autres espèces sont-elles formées ou consommées ? Même question pour  $\xi$  moles d'éthanol  $C_2H_5OH$  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  $\Delta_r H = -2\,244 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  ?
- 2) Cette énergie sert à chauffer 3 kg d'eau liquide, dont la température initiale est  $15^\circ C$ . 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 :  $c_0 = 4,18 \text{ kJ} \cdot K^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

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

### Exercice 11 : Réaction acido-basique

On dispose de 2 solutions à température ambiante  $\theta_0$ , toutes les deux à la même concentration  $C = 1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$  :

- une solution d'**acide chlorhydrique**  $H_3O^+ + Cl^-$
- une solution de **soude**  $Na^+ + HO^-$

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  $\xi_\infty$  ?
- 4) La température initiale de l'expérience est de  $19^\circ C$  ; la température finale en fin de réaction est de  $23,9^\circ C$ .
  - 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  $25^\circ C$ , de  $-55,8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

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

**Rép.** :  $\theta_f = 37,5^\circ C$

### **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  $T = 20^\circ C$ .
- 4) Montrer que l'on peut écrire un théorème des moments avec l'enthalpie comme dans le diagramme de Clapeyron.

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

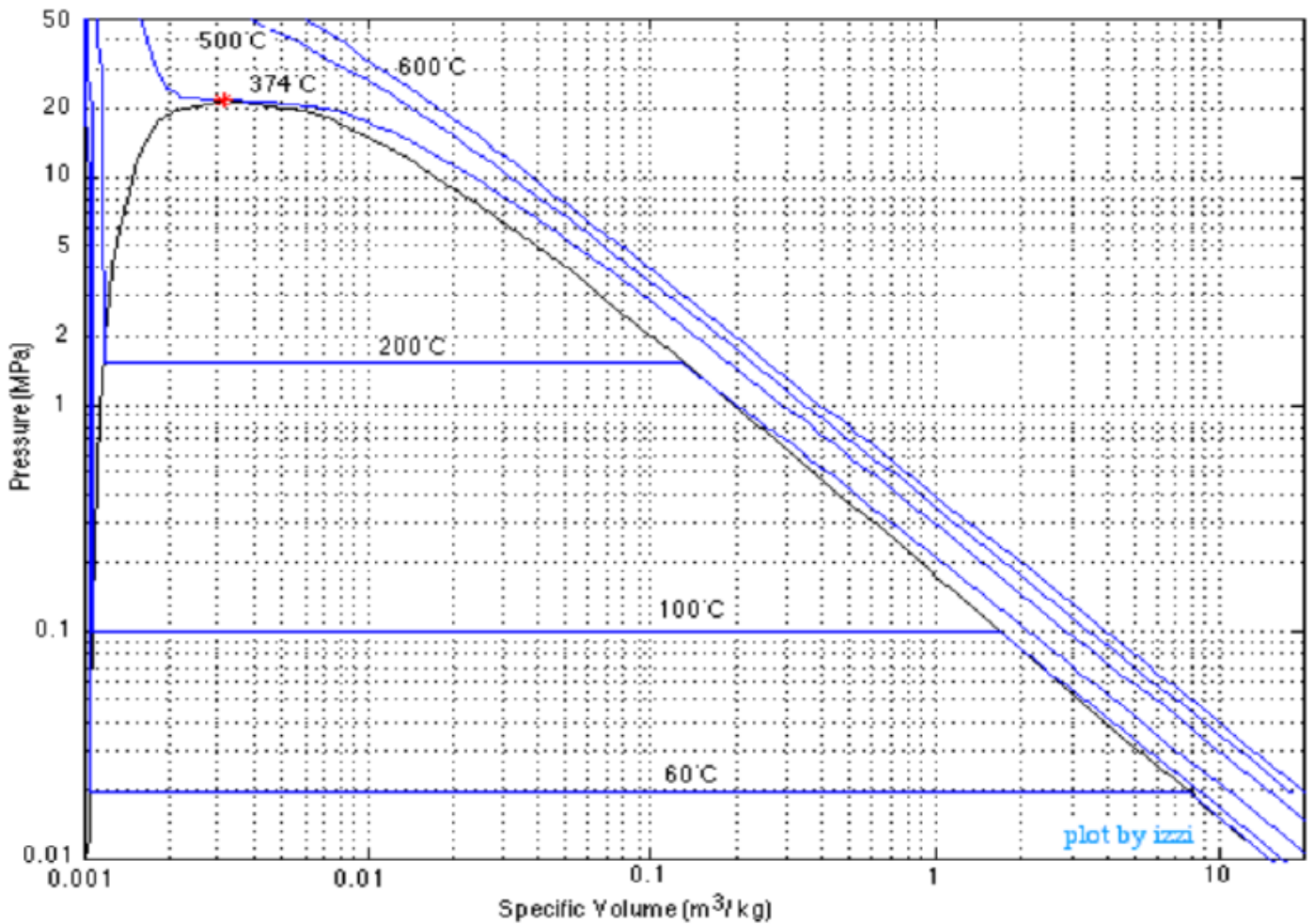


Figure 1 – Diagramme de Clapeyron de l'eau

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 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  $40^\circ\text{C}$ . 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 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  $m_r = 60 \text{ g}$  de diazote  $\text{N}_2$ ) 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 ( $c = 4,2 \text{ kJ/kg}$ ).

Quelques données caractéristiques du diazote :

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

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. :  $\Delta T \approx 8 \text{ à } 9 \text{ K}$

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

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

### **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  $485 \text{ K}$  et l'état final est à  $373 \text{ K}$ . Déterminer les caractéristiques de l'état final de 2 manières :



a) En utilisant le diagramme entropique de l'eau.

b) En utilisant les tables thermodynamiques complètes (cf. ci-contre).

		Liquide juste saturé $x_V = 0$			Vapeur saturante-sèche $x_V = 1$		
$T$	$p$	$v_L$	$h_L$	$s_L$	$v_V$	$h_V$	$s_V$
K	bar	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$	$\text{kJ}.\text{kg}^{-1}$	$\text{kJ}.\text{K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$	$\text{kJ}.\text{kg}^{-1}$	$\text{kJ}.\text{K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
485	20	$1,18.10^{-3}$	909	2,45	0,0998	2 801	6,35
373	1	$1,04.10^{-3}$	418	1,30	1,70	2 676	7,36

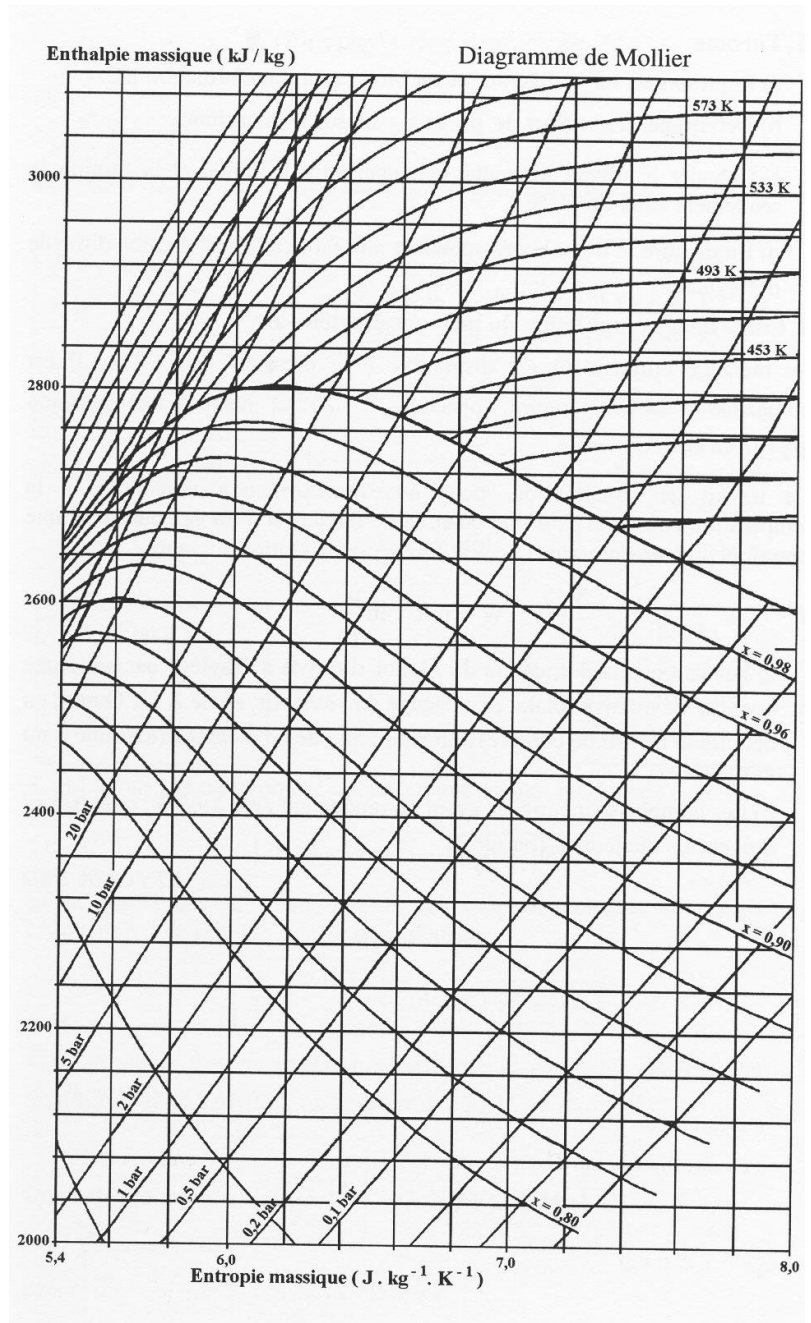
**Exercice 19 : Transformation d'une masse d'eau**

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  $\theta_2 = 81^\circ\text{C}$ .

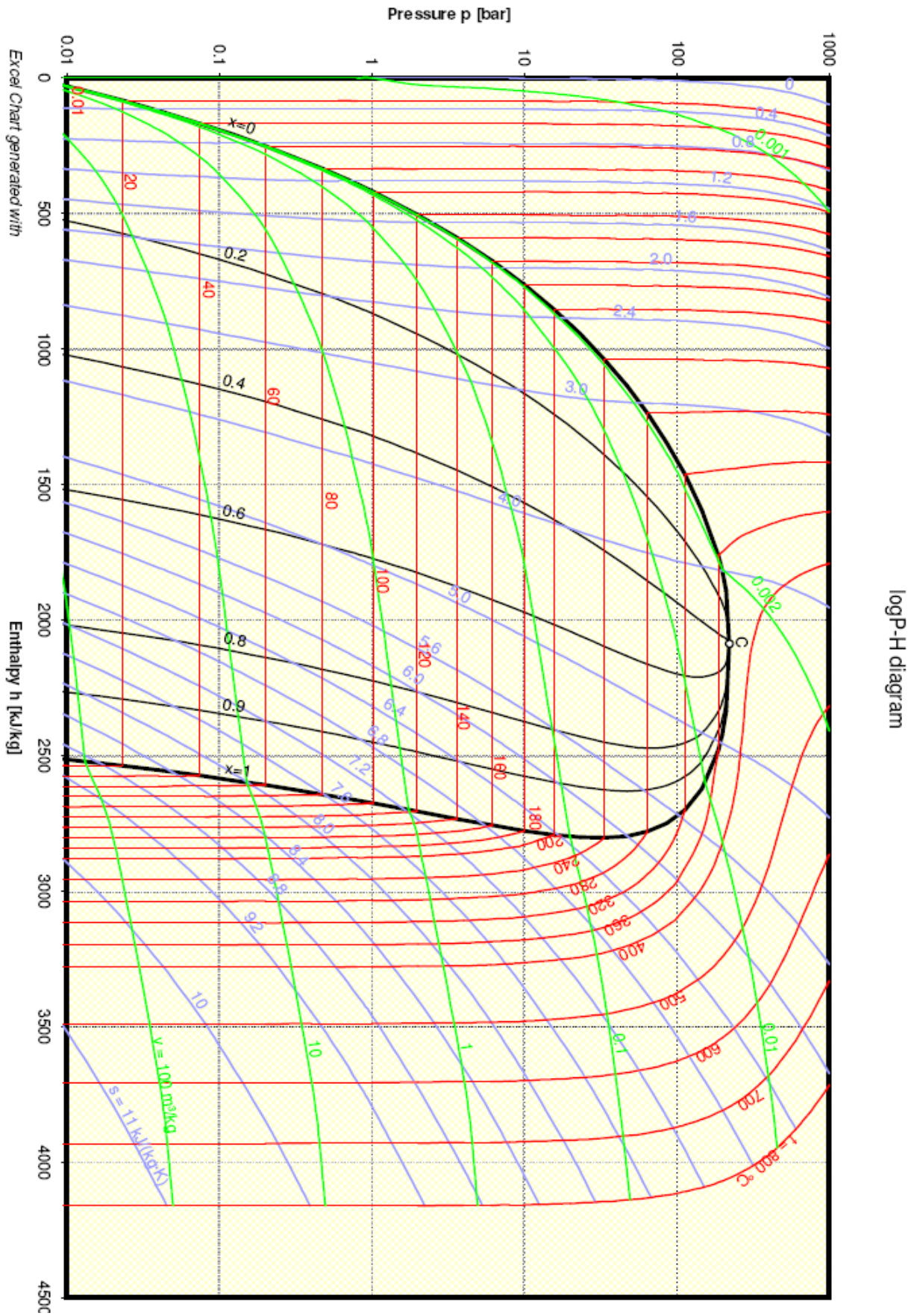
a. Représenter la transformation dans un diagramme  $(T, s)$ .

b. Déterminer à l'aide du diagramme de Mollier ci-dessous les valeurs de  $x_v$  et  $\Delta h$ .

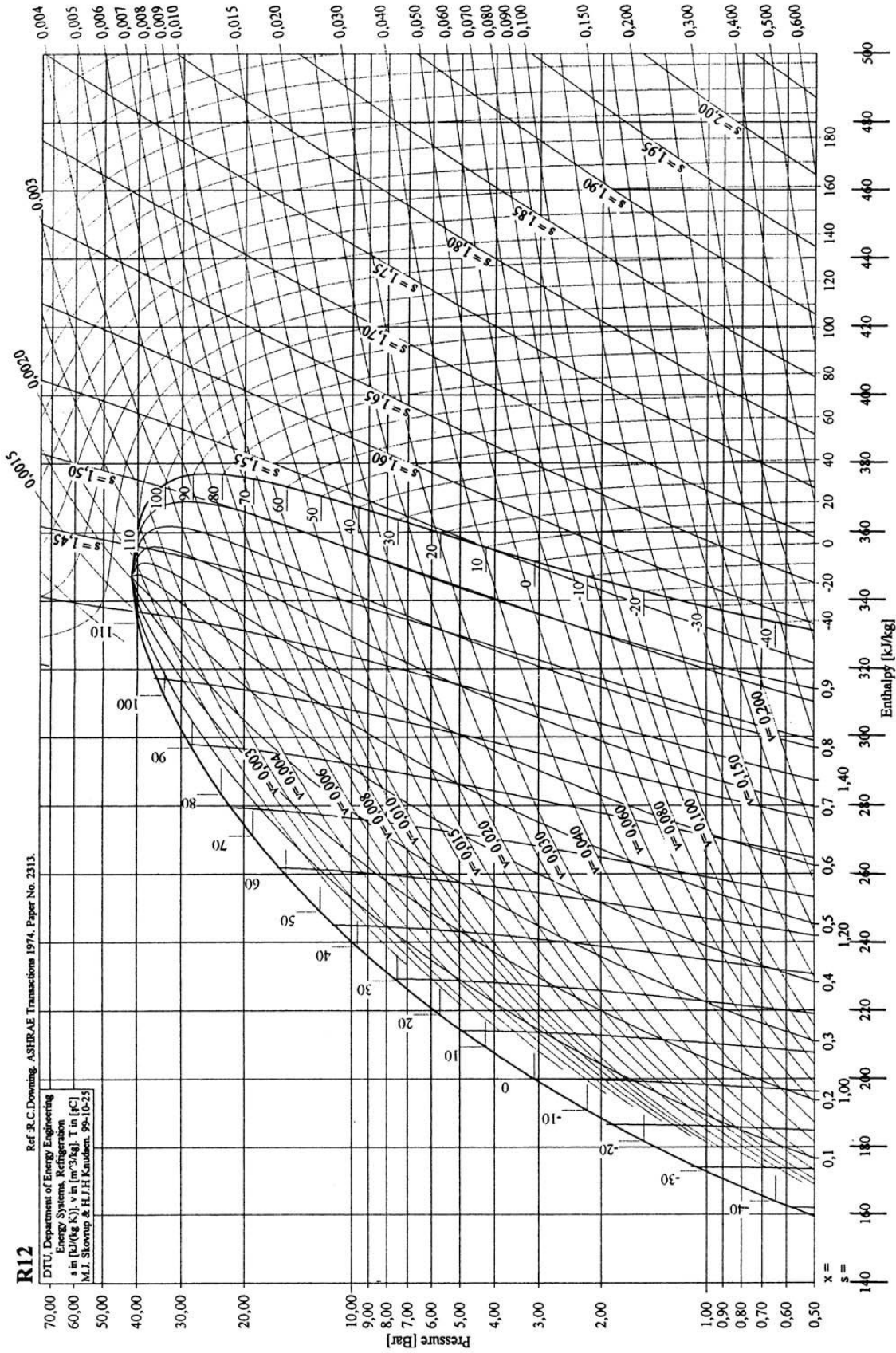
Rép. :  $x_v = 80\%$  ;  $\Delta h = -582 \text{ kJ}.\text{kg}^{-1}$



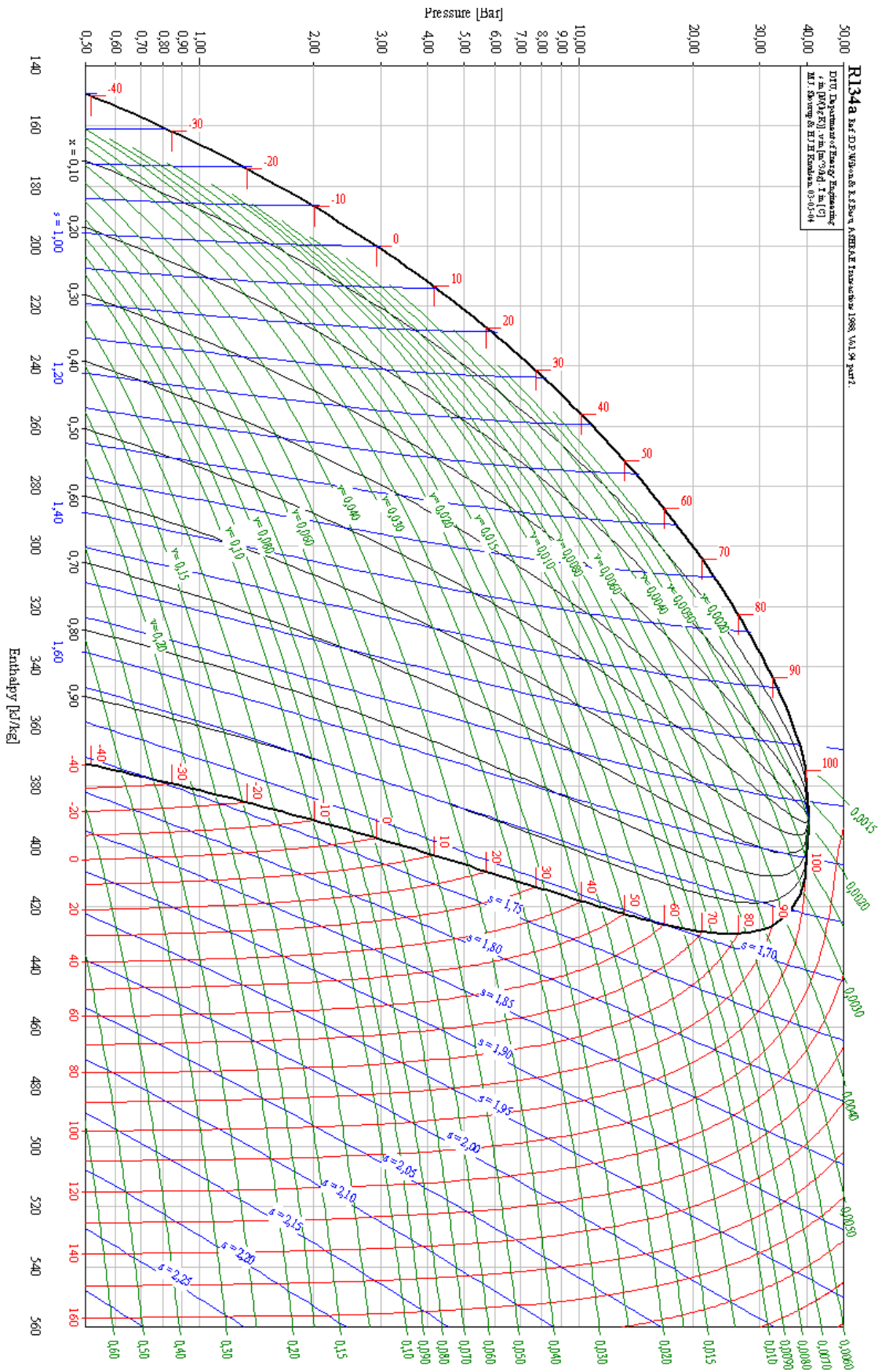
# Annexe 1



# Annexe 2



# Annexe 3



# Annexe 4

