

# CPGE ATS

## Programme de colles – Semaine 12 (15 au 19 décembre 2025)

Chapitres étudiés et questions de cours :

T3 Deuxième principe de la thermodynamique

T4 Machines thermiques (début). Le diagramme ( $T,s$ ) n'a pas été vu. Le diagramme ( $P,h$ ) n'a été vu que dans le cadre de l'exercice de cours 9 ci-dessous.

Réponses attendues en bleu ou manuscrit.

1<sup>ère</sup> question de cours : 4 formules du formulaire ci-dessous (pages 1 et 2)

2<sup>ème</sup> question de cours : 1 des questions 1 à 9 ci-après (pages 3 à 11)

### Relations générales

- Travail des forces de pression reçu par le système :  $\delta W_p = -p_{ext} dV$  soit  $W_p = - \int p_{ext} dV$   $p_{ext} = P$  si équilibre mécanique
- Energie totale  $E_{tot}$  :  $E_{tot} = U + Ec_{macro} + Ep_{ext}$  avec  $U$  énergie interne :  $U = Ec_{micro} + Ep_{int}$
- Bilan issu du 1<sup>er</sup> principe :  $\Delta E_{tot} = \Delta U + \Delta Ec_{macro} + \Delta Ep_{ext} = W + Q$  Cas usuel  $\Delta U = W + Q$   
Avec  $W = W_p + W_{\neq p}$  où  $W_{\neq p}$  travail utile et  $W_p$  travail des forces de pression
- Enthalpie :  $H = U + PV$  soit  $\Delta H = \Delta U + \Delta(PV)$

### Transformations particulières

$$\begin{aligned} \text{Adiabatique : } & \quad Q = 0 \\ & \quad \Delta U = W_{adiab} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Isochore : } & \quad W_p = 0 \\ & \quad \Delta U = Q_v + W_{\neq p} \end{aligned}$$

$$\text{Si réversibilité mécanique : } W_p = - \int P dV$$

$$\text{Isobare ; ou monobare avec } P_i = P_f = P_{ext}:$$

$$\begin{aligned} & \quad W_p = -p_{ext} \Delta V \\ & \quad \Delta H = Q_p + W_{\neq p} \end{aligned}$$

## Systèmes monophasés idéaux : Gaz parfaits et P.C.I.I. (phases condensées incompressibles indilatables)

### ■ Capacités thermiques :

Capacité thermique isochore  $C_v$  d'un système :  $Cv = \frac{dU}{dT}$  (en J.K<sup>-1</sup>),

Capacité thermique isobare  $C_p$  d'un système :  $Cp = \frac{dH}{dT}$  (en J.K<sup>-1</sup>).

- Corps condensés : modèle P.C.I.I. :  $V = Cte$  et  $C_p = C_v = C = mc$        $\Delta U \approx \Delta H \approx mc\Delta T$       si  $c \approx cte$

### ■ Gaz parfaits :

- Relation de Mayer :  $C_p - C_v = nR$  (en J/K) ;  $C_{p,m} - C_{v,m} = R$  (en J/mol/K) ;  $c_p - c_v = \frac{R}{M}$  (en J/kg/K).

- Coefficient de Laplace (ou isentropique)  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}}$$

- Capacités thermiques du gaz parfait :

$$C_v = \frac{nR}{\gamma-1} \quad \text{et} \quad C_p = \frac{\gamma nR}{\gamma-1}; \quad \text{soit}$$

$$C_{v,m} = \frac{R}{\gamma-1} \quad \text{et} \quad C_{p,m} = \frac{\gamma R}{\gamma-1};$$

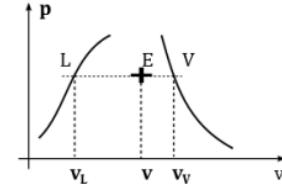
$$c_v = \frac{R}{M(\gamma-1)} \quad \text{et} \quad c_p = \frac{\gamma R}{M(\gamma-1)}$$

- ∀ transformation d'un G.P. si  $\gamma = cte$  :  $\Delta U = C_v \Delta T = \frac{nR}{\gamma-1} \Delta T$  et  $\Delta H = C_p \Delta T = \frac{\gamma nR}{\gamma-1} \Delta T$

- Lois de Laplace : Si 1) GP + 2) transformation adiabatique+ 3) réversible :  $PV^\gamma = cte$

### Transitions de phase

- Titre ou fraction massique d'un système sous 2 phases :  $x_i = \frac{m_i}{m_{tot}}$  et  $x_1 + x_2 = 1$



- Volume massique  $v$  en M, équilibre liquide-vapeur caractérisé par un titre en vapeur  $x_v$  :

$$v = x_v v_v + (1 - x_v) v_L$$

Règle des moments associée :  $x_v = \frac{v - v_L}{v_v - v_L} = \frac{LE}{LV}$

- Enthalpie massique de changement d'état, ou chaleur latente, à la température  $T$ , (en J/kg) : différence entre les enthalpies massiques du corps pur dans la phase 2 et dans la phase 1 à  $T$ , correspondant à la variation d'enthalpie par kg de corps subissant le changement d'état à la température  $T$  sous la pression atmosphérique.

$$\Delta_{1 \rightarrow 2} h(T) = h_2(T) - h_1(T) = l_{1 \rightarrow 2}(T) = -\Delta_{2 \rightarrow 1} h(T)$$

- Enthalpie massique  $\Delta_{vap} h(T)$  de vaporisation (L → V) :

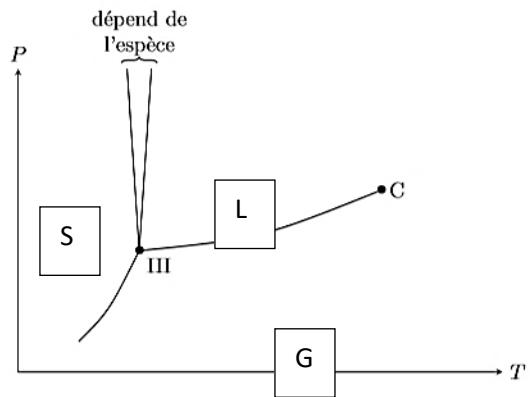
$$\Delta_{vap} h(T) = h_v(T) - h_l(T) = l_{vap}(T) = -\Delta_{liq} h(T)$$

- Bilan enthalpique d'un changement d'état isotherme et isobare :  $\Delta_{1 \rightarrow 2} H = m_{12} \Delta_{1 \rightarrow 2} h = m_{12} l_{1 \rightarrow 2}(T)$  ;

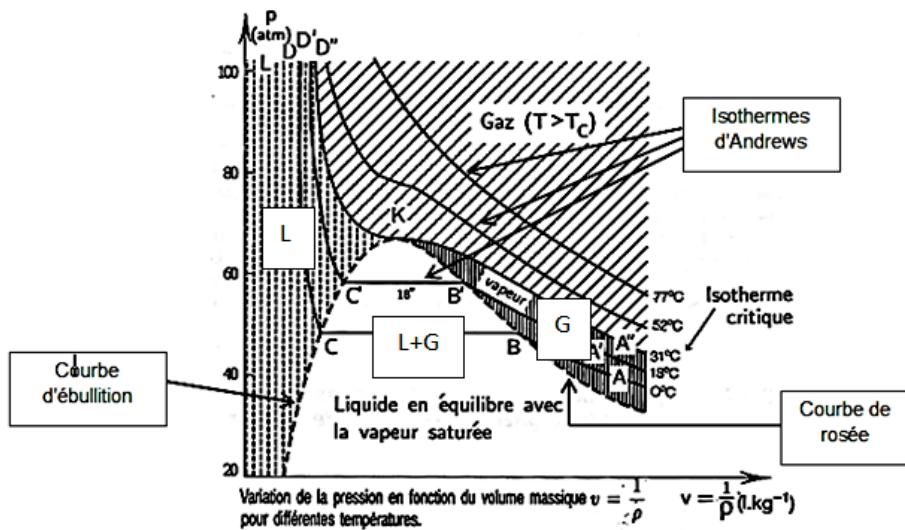
Avec  $m_{12}$  masse ayant subit le changement d'état, soit  $m_{12} = m_{2,F} - m_{2,I} = m_{tot} (x_{2,F} - x_{2,I})$

## **Exercices de cours :**

- 1) Diagramme de phase ( $P$ ,  $T$ ) d'une espèce diphasée : tracer l'allure du diagramme, savoir placer les phases Solide S, Liquide L, Gazeuse G, le point triple III, le point critique C.



- 2) Diagramme de Clapeyron ( $P, v$ ) d'une espèce diphasée (**fourni**) : savoir placer les phases Liquide  $L$ , Gazeuse  $G$ , la zone d'équilibre liquide vapeur  $LG$ , savoir tracer une isotherme, identifier la courbe d'ébullition, la courbe de rosée.



### 3) Fonction entropie ; unité. Deuxième principe de la thermodynamique : Bilan d'entropie.

$S$ , grandeur extensive, fonction d'état « entropie ». Unité : J.K<sup>-1</sup>.

$$\Delta S = S_{\text{éch}} + S_{\text{créée}} ;$$

$$S_{\text{éch}} = \frac{Q}{T_{\text{ext}}} \text{ avec } T_{\text{ext}} \text{ température de l'extérieur (thermostat)} ;$$

$S_{\text{créée}} \geq 0$  traduit l'irréversibilité de la transformation.

- 4) A partir de la loi de Laplace  $PV^\gamma = cte_1$ , retrouver (justifier) les lois  $TV^{\gamma-1} = cte_2$  et  $T^\gamma P^{1-\gamma} = cte_3$ .

$$PV^\gamma = cte_1 \quad (1)$$

$$PV = nRT \text{ d'où } P = \frac{nRT}{V}$$

$$\text{On remplace dans (1) : } \frac{nRT}{V} V^\gamma = cte_1 \text{ c'est à dire } TV^{\gamma-1} = \frac{cte_1}{nR} = cte_2$$

$$PV^\gamma = cte_1 \quad (1)$$

$$PV = nRT \text{ d'où } V = \frac{nRT}{P}$$

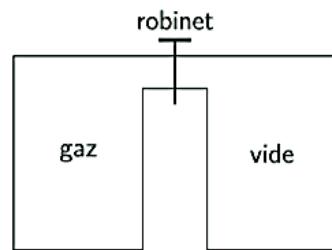
$$\text{On remplace dans (1) : } P \left( \frac{nRT}{P} \right)^\gamma = cte_1 \text{ c'est à dire } T^\gamma P^{1-\gamma} = \frac{cte_1}{(nR)^\gamma} = cte_3$$

Rappel : On ne calcule pas ces constantes mais on écrit ces relations pour deux points A et B qui marquent le début et la fin d'une transformation isentropique réversible :

$$P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma \text{ par exemple}$$

### 5) Détente de Joule Gay-Lussac

« L'appareil à deux globes » est constitué de deux ballons en verre de quatorze litres environ, reliés entre eux par une tubulure de laiton munie d'un robinet. L'un des ballons peut être relié à une machine pneumatique permettant d'y faire le vide, ou à une réserve de gaz.



Supposons la demi-enceinte de droite initialement vide. Lorsque l'on ouvre le robinet, le gaz se répand très rapidement dans le vide. On raisonne sur le gaz initialement contenu dans la demi-enceinte de gauche.

1 - Justifier qu'on peut approximer la transformation du gaz comme étant adiabatique et sans travail échangé.

2 - Exprimer le volume et la température finale du gaz  $V_F$  et  $T_F$  en fonction des valeurs initiales  $V_I$  et  $T_I$ .

3 - Déterminer l'entropie créée au cours de la transformation. Interpréter.

On donne :  $\Delta S = \frac{nR}{\gamma-1} \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) + nR \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$

- 1) On peut raisonner sur l'ensemble Gaz + Vide : la transformation étant isochore, le travail  $W$  est nul :  $W=0$ .

La transformation est rapide, donc peut être considérée comme adiabatique :  $Q=0$ .

- 2) 1<sup>er</sup> Principe :  $\Delta U = W + Q = 0 = C_V \cdot \Delta T$  d'où :  $T_f = T_i$ .

$V_f = 2 \cdot V_i$  car le gaz se répand dans un volume deux fois plus grand.

- 3)  $\Delta S = \frac{nR}{\gamma-1} \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) + nR \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) = nR \ln 2$

$$\Delta S = S_{éch} + S_{créée}$$

$$\text{Ici : } S_{éch} = \frac{Q}{T_{ext}} = 0 \text{ d'où } S_{créée} = \Delta S = nR \ln 2$$

## 6) Refroidissement d'un solide

Considérons un solide de masse  $m$ , sorti d'un four à la température  $T_1$  et placé pour refroidissement à l'air libre à la température  $T_0$ . Procéder au bilan entropique de la transformation. Commenter le signe de l'entropie créée.

Transformation monobare et monothermique ;  $S_{éch} = \text{maison}$   
 Air = thermostat.

$$\Delta S = C \ln \frac{T_0}{T_1}$$

Remarque :  $\Delta S > 0$  si  $T_0 > T_1$   
 $\Delta S < 0$  si  $T_0 < T_1$  (ici).

Transformation monobare

$\Rightarrow$  1<sup>er</sup> principe avec enthalpie.

$$\Delta H = W_{ff} + Q = Q = C \cdot \Delta T = C(T_0 - T_1)$$

d'où :  $S_{éch} = \frac{Q}{T_0} = C\left(1 - \frac{T_1}{T_0}\right)$

Pour finir,

$$S_{créée} = \Delta S - S_{éch} = C \ln \frac{T_0}{T_1} - C\left(1 - \frac{T_1}{T_0}\right)$$

$$S_{créée} = C\left(\frac{T_1}{T_0} - \ln \frac{T_1}{T_0} - 1\right) > 0 \text{ pour } T_1 > T_0 \text{ (à vérifier).}$$

- 7) Expression générale du rendement d'un moteur thermique ; Cycle de Carnot : retrouver l'expression du rendement en fonction des températures des sources chaude et froide.

$$\eta = -\frac{W_{TOT}}{Q_C} \quad (1)$$

Premier principe appliqué au cycle :

$$\Delta U_{cycle} = W_{TOT} + Q_C + Q_f = 0 \text{ d'où : } W_{TOT} = -Q_C - Q_f \quad (2)$$

Deuxième principe appliqué au cycle :

$$\Delta S_{cycle} = S_{éch} + S_{créée} = 0$$

Cycle réversible, d'où :

$$\Delta S_{cycle} = S_{éch} + S_{créée} = \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_f}{T_f} + 0 \text{ d'où : } Q_f = -Q_C \frac{T_f}{T_C} \quad (3)$$

De (1), (2) et (3) on déduit le rendement de Carnot :

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_C}$$

- 8) Expression générale de l'efficacité d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur ; Cycle de Carnot : retrouver l'expression de l'efficacité en fonction des températures des sources chaude et froide.

$$e_{frigo} = \frac{Q_f}{W} \text{ et } e_{PAC} = -\frac{Q_C}{W} \quad (1)$$

Premier principe appliqué au cycle :

$$\Delta U_{cycle} = W + Q_C + Q_f = 0 \text{ d'où : } W = -Q_C - Q_f \quad (2)$$

Deuxième principe appliqué au cycle :

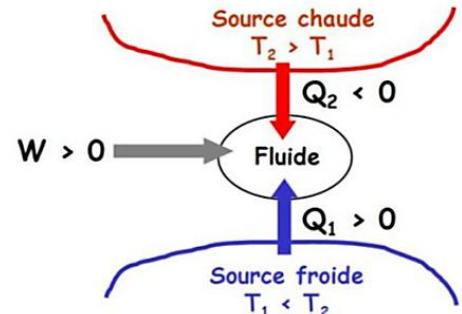
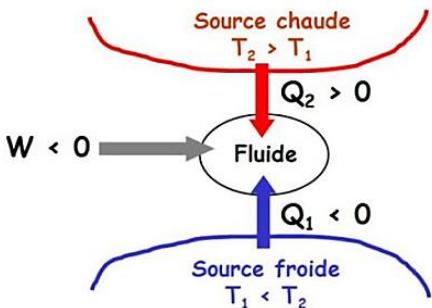
$$\Delta S_{cycle} = S_{éch} + S_{créée} = 0$$

Cycle réversible, d'où :

$$\Delta S_{cycle} = S_{éch} + S_{créée} = \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_f}{T_f} + 0 \quad (3)$$

De (1), (2) et (3) on déduit l'efficacité de Carnot :

$$e_{frigo} = \frac{T_f}{T_C - T_f} \text{ et } e_{PAC} = \frac{T_C}{T_C - T_f}$$



- 9) (Exercice 3 TD T4) Etudions la détente dite de Joule-Kelvin du fluide réfrigérant R112 dans une machine frigorifique : cette détente a lieu dans un système calorifugé (on considérera donc que le système subit une transformation adiabatique), dans des conditions telles que la détente est isenthalpique.

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

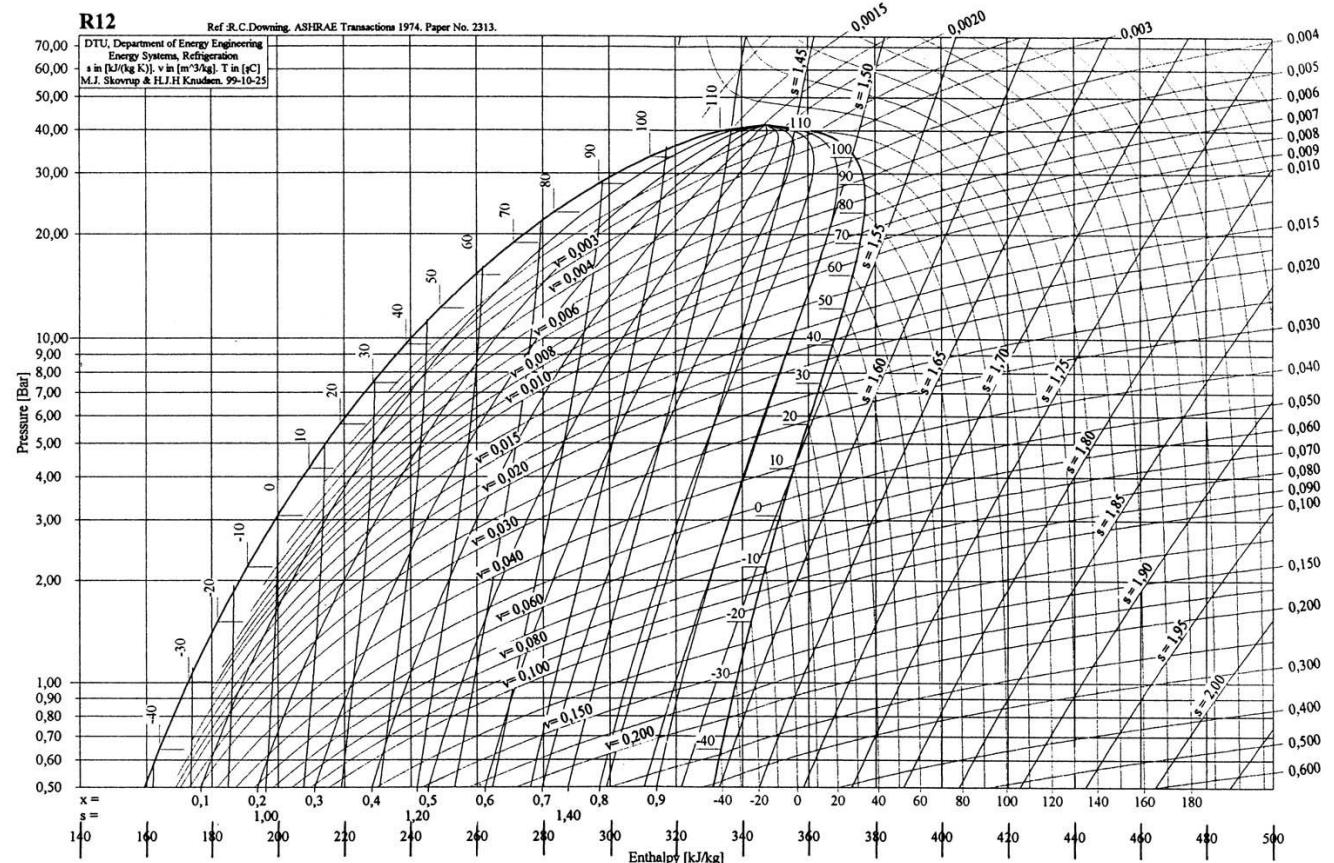
Déterminer les caractéristiques de l'état final (titre en vapeur  $x_V$ ).

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

- 1) Utilisation du diagramme des frigoristes (donné ci-dessous).
- 2) Utilisation des tables thermodynamiques (données ci-dessous).
- 3) Utilisation des données thermodynamiques restreintes :

$$T_A = 303 \text{ K}, P_A = P^*(T_A) = 7,4 \text{ bars}, x_{VA} = 0; T_B = 263 \text{ K}, P_B = P^*(T_B) = 2,2 \text{ bars};$$

$$C_{liq,fréon} = \text{cte} = 960 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}; \Delta_{vap}h(T_B) = 158 \text{ kJ.kg}^{-1}$$



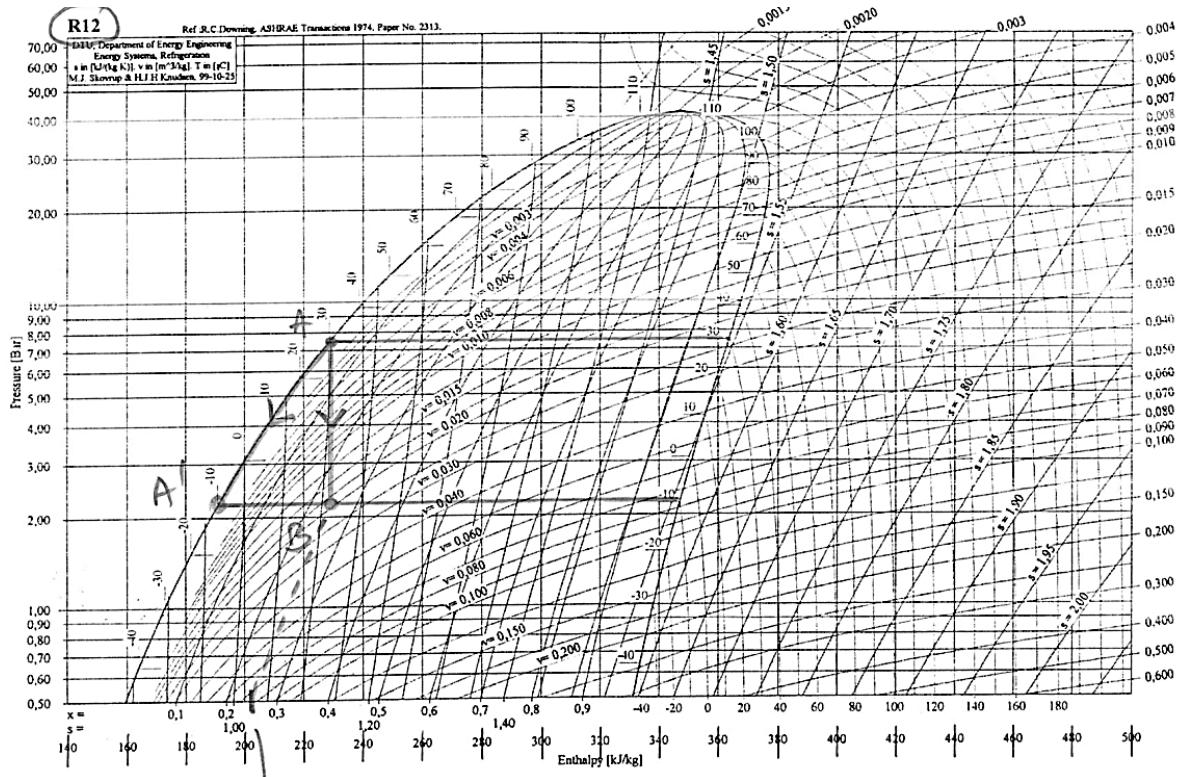
**Table 1 (continued)**  
**DuPont™ Freon® 12 Saturation Properties — Temperature Table**

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m³/kg]		Density [kg/m³]		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 [m³/kg]		Density [kg/m³]		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	146.8	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

1) Tracé sur diagramme des frigoristes ci-dessous : On lit  $x_V \approx 0.25$



Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m³/kg]		Density [kg/m³]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K·kg]		Temp °C
		Liquid V <sub>1</sub>	Vapour V <sub>2</sub>	Liquid d <sub>1</sub>	Vapour d <sub>2</sub>	Liquid H <sub>1</sub>	Latent H <sub>2</sub>	Vapour H <sub>2</sub>	Liquid S <sub>1</sub>	Vapour S <sub>2</sub>	
-20	150.7	0.0007	0.1098	1458.0	0.109	181.6	162.1	343.7	0.9305	1.5710	-20
-19	156.7	0.0007	0.1059	1455.0	0.446	182.5	161.6	344.1	0.9341	1.5700	-19
-18	162.8	0.0007	0.1021	1452.0	0.792	183.4	161.2	344.6	0.9376	1.5690	-18
-17	169.1	0.0007	0.0936	1449.0	1.150	184.3	160.8	345.1	0.9412	1.5690	-17
-16	175.6	0.0007	0.0951	1446.0	1.510	185.2	160.3	345.5	0.9447	1.5680	-16
-15	182.3	0.0007	0.0918	1443.0	1.890	186.1	159.9	346.0	0.9482	1.5670	-15
-14	189.2	0.0007	0.0837	1440.0	2.270	187.1	159.5	346.4	0.9517	1.5670	-14
-13	196.3	0.0007	0.0857	1437.0	2.670	188.0	158.9	346.9	0.9552	1.5660	-13
-12	203.6	0.0007	0.0828	1434.0	3.080	189.9	158.5	347.4	0.9587	1.5660	-12
-11	211.1	0.0007	0.0800	1431.0	3.500	190.8	158.0	347.8	0.9622	1.5660	-11
-10	218.8	0.0007	0.0774	1428.0	3.920	191.7	157.6	348.3	0.9656	1.5640	-10
-9	226.7	0.0007	0.0748	1425.0	4.370	191.6	157.1	348.7	0.9691	1.5640	-9
-8	234.8	0.0007	0.0724	1421.0	4.820	192.6	156.6	349.2	0.9726	1.5630	-8
-7	243.2	0.0007	0.0700	1418.0	5.280	193.5	156.2	349.7	0.9760	1.5630	-7
-6	251.8	0.0007	0.0678	1415.0	5.760	194.4	155.7	350.1	0.9795	1.5620	-6
-5	260.6	0.0007	0.0656	1412.0	6.240	195.3	155.3	350.6	0.9826	1.5620	-5
-4	269.6	0.0007	0.0635	1409.0	6.740	196.3	154.7	351.0	0.9863	1.5610	-4
-3	278.9	0.0007	0.0615	1406.0	7.260	197.2	154.3	351.5	0.9896	1.5610	-3
-2	288.4	0.0007	0.0596	1402.0	7.800	198.1	153.8	351.9	0.9932	1.5600	-2
-1	298.1	0.0007	0.0577	1399.0	8.320	199.1	153.3	352.4	0.9966	1.5600	-1
0	308.1	0.0007	0.0559	1396.0	8.870	200.0	152.8	352.8	1.0000	1.5590	0
1	318.4	0.0007	0.0542	1393.0	9.440	200.9	152.4	353.3	1.0030	1.5590	1
2	328.9	0.0007	0.0526	1390.0	10.020	201.9	151.8	353.7	1.0070	1.5590	2
3	339.7	0.0007	0.0510	1386.0	10.610	202.8	151.3	354.1	1.0100	1.5580	3
4	350.7	0.0007	0.0495	1383.0	11.220	203.6	150.8	354.6	1.0140	1.5580	4
5	362.0	0.0007	0.0480	1380.0	11.840	204.7	150.3	355.0	1.0170	1.5570	5
6	373.6	0.0007	0.0466	1377.0	12.460	205.7	149.7	355.4	1.0200	1.5570	6
7	385.4	0.0007	0.0452	1373.0	12.100	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 <sub>1</sub>	Vapour V <sub>2</sub>	Liquid d <sub>1</sub>	Vapour d <sub>2</sub>	Liquid H <sub>1</sub>	Latent H <sub>2</sub>	Vapour H <sub>2</sub>	Liquid S <sub>1</sub>	Vapour S <sub>2</sub>	
8	397.6	0.0007	0.0439	1376.0	22.880	207.6	148.7	256.3	1.0270	1.5560	8
9	410.0	0.0007	0.0426	1357.0	23.480	208.5	148.2	256.7	1.0300	1.5560	9
10	422.7	0.0007	0.0414	1338.0	24.180	209.5	147.7	257.2	1.0340	1.5550	10
11	435.7	0.0007	0.0402	1320.0	24.900	210.4	147.2	257.6	1.0379	1.5550	11
12	448.9	0.0007	0.0390	1315.0	25.630	211.4	146.6	258.0	1.0400	1.5550	12
13	462.5	0.0007	0.0379	1313.0	26.380	212.3	146.2	258.5	1.0440	1.5540	13
14	476.4	0.0007	0.0368	1310.0	27.150	213.3	145.6	258.9	1.0470	1.5540	14
15	490.6	0.0007	0.0359	1306.0	27.930	214.3	145.0	259.3	1.0500	1.5540	15
16	505.1	0.0007	0.0349	1302.0	28.740	215.2	144.5	259.7	1.0540	1.5530	16
17	520.0	0.0008	0.0338	1300.0	29.560	216.2	143.9	260.1	1.0570	1.5530	17
18	535.1	0.0008	0.0329	1296.0	30.400	217.2	143.3	260.5	1.0600	1.5530	18
19	550.6	0.0008	0.0320	1292.0	31.260	218.2	142.8	261.0	1.0640	1.5520	19
20	566.4	0.0008	0.0311	1289.0	32.150	219.1	142.3	261.4	1.0670	1.5520	20
21	582.6	0.0008	0.0303	1285.0	33.030	220.1	141.7	261.8	1.0700	1.5520	21
22	599.0	0.0008	0.0295	1282.0	33.950	221.1	141.1	262.2	1.0740	1.5510	22
23	615.9	0.0008	0.0287	1280.0	34.890	222.1	140.5	262.6	1.0770	1.5510	23
24	633.0	0.0008	0.0279	1278.0	35.850	223.1	139.9	263.0	1.0800	1.5510	24
25	650.6	0.0008	0.0272	1271.0	36.830	224.1	139.3	263.4	1.0830	1.5510	25
26	668.5	0.0008	0.0264	1267.0	37.820	225.1	138.7	263.8	1.0870	1.5500	26
27	686.7	0.0008	0.0257	1264.0	38.810	226.0	138.2	264.2	1.0900	1.5500	27
28	705.3	0.0008	0.0251	1260.0	39.800	227.0	137.5	264.5	1.0930	1.5500	28
29	724.3	0.0008	0.0244	1256.0	40.870	228.0	136.9	264.9	1.0960	1.5490	29
30	743.7	0.0008	0.0238	1252.0	42.070	229.0	136.3	265.3	1.1000	1.5490	30
31	763.4	0.0008	0.0232	1249.0	43.180	230.0	135.7	265.7	1.1030	1.5490	31
32	783.5	0.0008	0.0226	1245.0	44.330	231.1	135.0	266.1	1.1060	1.5490	32
33	804.0	0.0008	0.0220	1241.0	45.490	232.1	134.3	266.4	1.1090	1.5480	33
34	824.9	0.0008	0.0214	1238.0	46.690	233.1	133.7	266.8	1.1130	1.5480	34
35	846.2	0.0008	0.0209	1234.0	47.910	234.1	133.1	267.2	1.1160	1.5480	35

2) Table :

$$T_A = 303 \text{ K} = 30^\circ\text{C} \quad \text{+ liquide saturant}$$

$$\rightarrow h_f = 229,0 \text{ kJ/kg} = h_A$$

Densité isenthalpique

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

(é lange diphase)

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

D'où :

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

$$x_v = \frac{h_A - h_f}{h_g - h_f} \quad (\text{Règle des Composants !})$$

(en  $\frac{h_f - h_A}{h_g - h_f}$ )

$$\text{AN: } x_v = \frac{229,0 - 190,7}{248,3 - 190,7} = 0,24$$

3)  $\Delta h_{A \rightarrow B} = 0 = \Delta h_{A \rightarrow A'} + \Delta h_{A' \rightarrow B}$   
 Car enthalpie fonction d'état.

Avec :  $A \rightarrow A'$  : Débute, liquide saturant  
 $A' \rightarrow B$  : Vaporation partielle à  $T = T_B$ .

$\Delta h_{A \rightarrow A'} = C(T_A - T_B) = C(T_B - T_A)$ .  
 Donc  $\Delta h_{A \rightarrow B} = x_v \cdot \Delta_{\text{vap}} h(T_B)$

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

Puis : de 1 à 2 exercices proposés par le colleur.

### Programme ATS

9. Deuxième principe de la thermodynamique	
Fonction d'état entropie, caractère extensif.	Déterminer une variation d'entropie pour une transformation, les entropies des systèmes en présence (gaz parfait ou phase condensée) étant fournies.  Exploiter l'extensivité de l'entropie.
Thermostat.	Identifier des situations où un système peut être modélisé par un thermostat.
Entropie échangée avec un ou plusieurs thermostats.	Relier l'entropie échangée par un système avec un thermostat au transfert thermique reçu par le système et à la température du thermostat.
Deuxième principe de la thermodynamique.  Transformations réversibles et irréversibles.	Énoncer le deuxième principe de la thermodynamique.  Justifier que le deuxième principe de la thermodynamique est un principe d'évolution.
Entropie créée	Identifier des causes d'irréversibilité dans une transformation.  Exploiter le fait qu'une transformation adiabatique et réversible est isentropique.
Lois de Laplace.	L'entropie molaire d'un gaz parfait étant fournie, établir une loi de Laplace exprimée en fonction des variables (P,V), (P,T) ou (T,V) et faisant apparaître le rapport $\gamma$ des capacités thermiques à pression et volume constants.  Exploiter les lois de Laplace dans les cas de transformations isentropiques de gaz parfaits.

<b>10. Machines cycliques dithermes en système fermé</b>	
Représentation schématique des machines cycliques dithermes.	Prévoir les signes des transferts d'énergie en fonction de l'application recherchée. Définir le rendement d'un moteur.
Cas des moteurs, pompes à chaleur et machines frigorifiques.	Définir le coefficient de performance (CoP) (ou efficacité) d'une machine frigorifique et celui d'une pompe à chaleur (PAC).
Inégalité de Clausius pour les machines cycliques dithermes.  Théorème de Carnot.	Déterminer le rendement ou le coefficient de performance (CoP) maximum des machines cycliques dithermes.  Exploiter le théorème de Carnot pour juger de la performance d'une machine thermique.
Diagramme de Watt (P,V) et diagramme entropique (T,S).	Donner une interprétation énergétique de l'aire des cycles et de leur sens de parcours dans les diagrammes (P,V) et (T,S) pour un cycle réversible. Tracer l'allure d'un cycle de Carnot d'un gaz parfait dans un diagramme de Watt et un diagramme entropique.  Capacité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, tracer le cycle d'un moteur dans un diagramme de Watt ou dans un diagramme entropique. Déterminer le travail fourni et le rendement.
Modélisation d'un moteur réel à pistons : exemples du moteur à combustion interne et du moteur diesel.	Associer les temps mécaniques (4 temps ou 2 temps) d'un moteur à piston aux différentes transformations du cycle moteur.
Puissance d'un moteur, consommation d'énergie.	Déterminer la puissance d'un moteur et la puissance thermique nécessaire à son fonctionnement connaissant les caractéristiques d'un cycle.  Déterminer la consommation d'énergie nécessaire pour qu'un moteur fournisse un travail donné.