

MEC1210_Thermodynamique **(Heures 9-11)**

Propriétés des corps purs, simples et compressibles



Smail Guenoun

(D'après les notes de cours de Pr.Huu Duc Vo)

Objectifs

- ✓ Définir le concept d'une substance pure
- ✓ Illustrer les diagrammes P-v, T-v, P-T et P-v-T
- ✓ Apprendre à utiliser les tables thermodynamiques
- ✓ Définir le concept du gaz parfait et l'équation d'état

Rappels

- 1) Substance pure :** Substance de composition chimique uniforme et constante (dans l'espace) (éléments purs ou mélanges chimiquement uniformes)
- 2) Phase:** quantité de matière physiquement homogène (solide , liquide, gaz) et de composition chimique uniforme
- 3) État:** l'état d'un système thermodynamique est défini par la valeur de ses propriétés. *Il faut noter que les propriétés ne sont pas toutes indépendantes les uns des autres. Donc, on peut spécifier un nombre limité de propriétés pour définir un état.*

Postulat d'état

Le postulat d'état établit le nombre maximal de propriétés pouvant être fixées de façon indépendante pour spécifier un état.

Postulat d'état

Postulat d'état: Pour un système de composition chimique constante, le nombre de propriétés intensives indépendantes (n) pouvant fixer un état est:

$n = m + 1$ où m est le nombre de forces généralisées (pression, gravitation, électrique, ...) pouvant effectuer un travail quasi-statique.

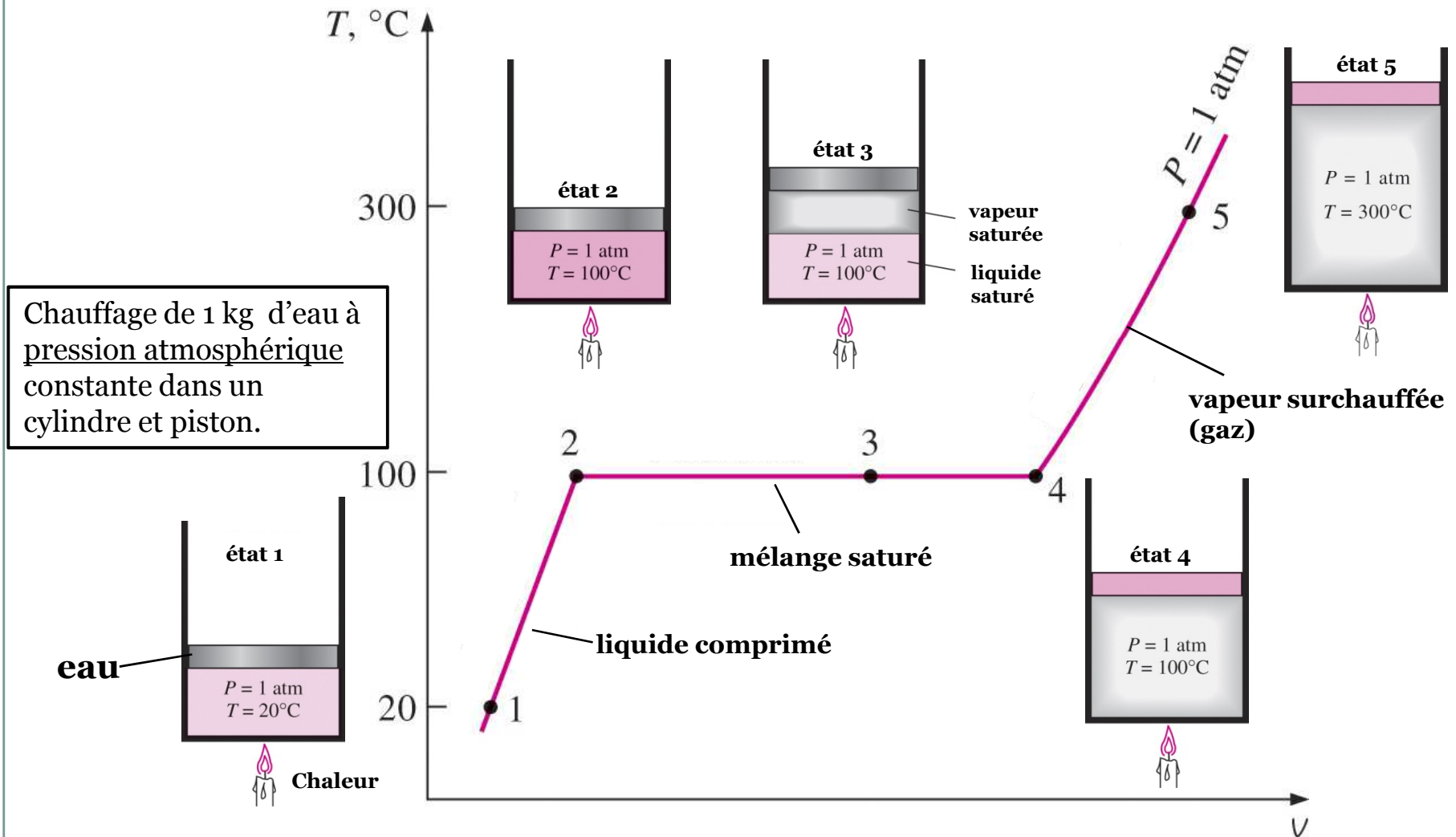
Système simple et compressible: système sans effet gravitationnel, électrique, magnétique, cinétique et tension de surface..., ou la seule force pouvant effectuer un travail quasi-statique est la pression: $m=1 \rightarrow n=2$

Donc pour un système simple et compressible, un état peut être spécifié par deux propriétés intensives indépendantes (exemple: P et T , ou P et ρ , ou T et ρ ; soit $u=f(P,T)$, $f(P,\rho)$ ou $f(T,\rho)$)

Notes:

- Deux propriétés sont indépendantes si on peut varier une, en gardant l'autre constante

Relations P-v-T



Relations P-v-T

États 1 à 2: - l'eau est sous forme de **liquide comprimé**, c'est-à-dire un liquide qui n'est **pas** sur le point de s'évaporer (ex.: eau à 1 atm, en bas de 100 °C). La température augmente (la chaleur fournie augmente l'énergie sensible)

État 2: l'eau commence à vaporiser (changement de phase liquide-gaz)

États 2 à 4: - deux phases de l'eau (liquide, gaz) co-existent en équilibre, dont:

- i) **liquide saturé**: liquide sur le point de vaporiser
- ii) **vapeur saturée**: gaz sur le point de condenser

✓ la température reste constante pendant le changement de phase (la chaleur fournie casse les liens entre molécules caractérisant la phase liquide)

✓ **Énergie latente de vaporisation**: énergie absorbée par unité de masse vaporisée

✓ Le taux de vaporisation dépend du taux de chaleur ajoutée (dQ/dt).

État 4: l'eau liquide vient d'être entièrement évaporée

États 4 à 5: - l'eau est sous forme de **vapeur surchauffée**, c'est-à-dire un gaz qui n'est **pas** sur le point de se condenser (ex.: eau à 1 atm, en haut de 100 °C).

- la température augmente (la chaleur fournie augmente l'énergie sensible)

Note: Si on enlève de la chaleur à partir de l'état 5, l'évolution 5-1 reprend le même chemin en direction inverse

Diagramme T-v

Si on répétait l'exercice précédent, à chaque fois avec une pression constante différente, en changeant la masse du piston.

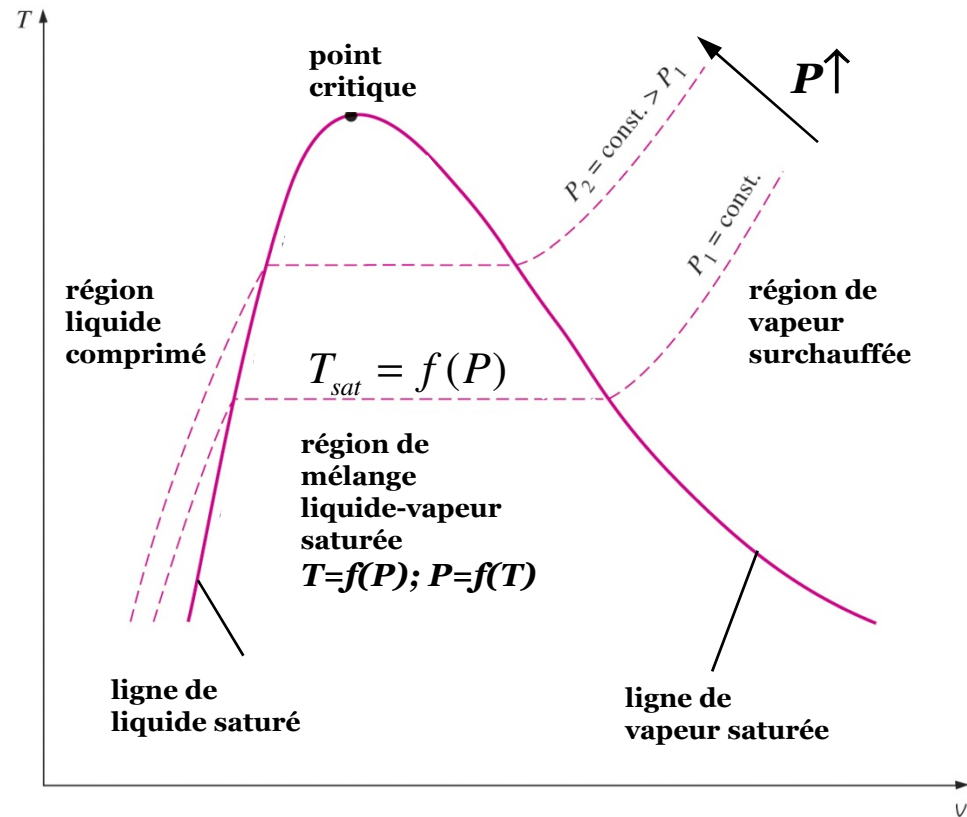
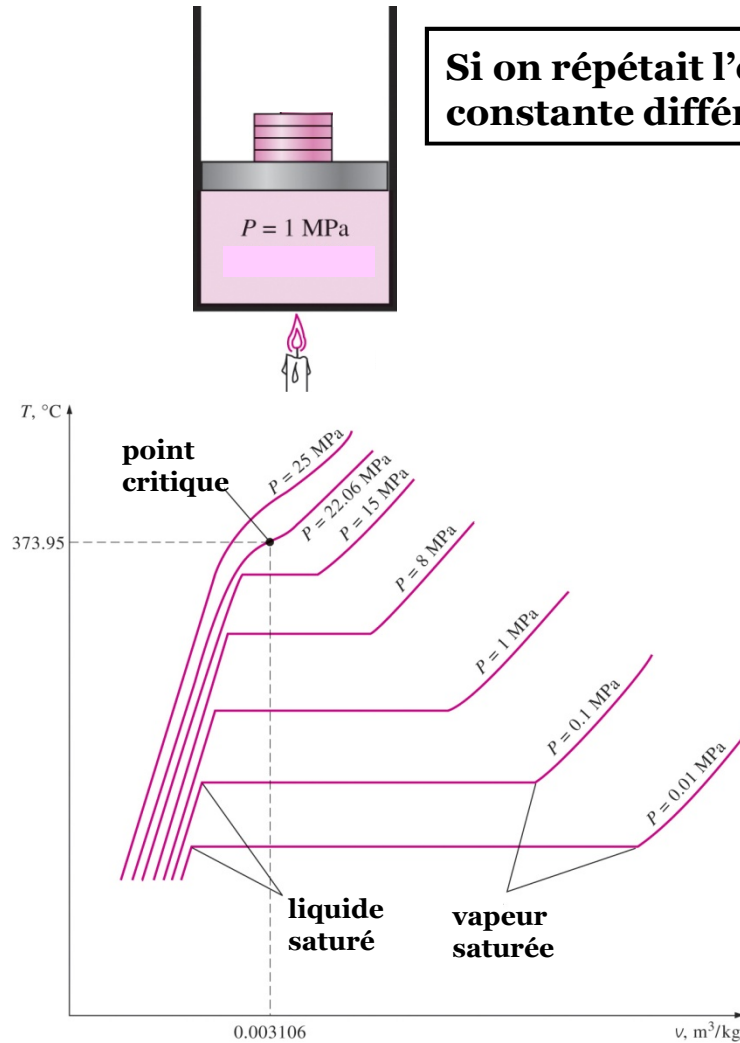


Diagramme T-v

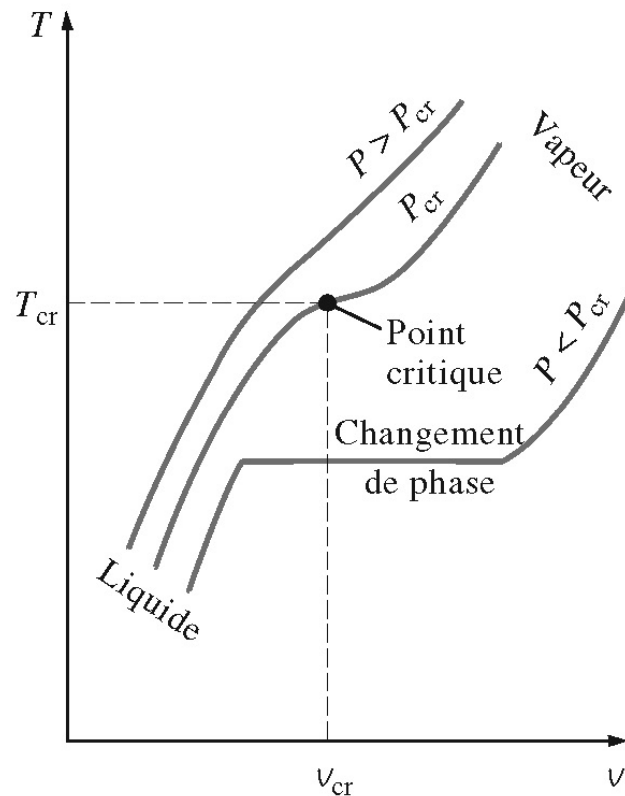


FIGURE 3.16

À des pressions surcritiques ($P > P_{cr}$), il n'y a plus de changement de phase.

Point critique

Le **point critique** est le point où les états du liquide saturé et de la vapeur saturée sont identiques.

- On définit la **pression critique**, température critique comme étant la pression et la température d'une substance se trouvant au point critique.
- À des pressions supérieures à la pression critique, il n'y a **pas de changement de phase distinct**. Le volume massique augmente continuellement et il y a toujours une phase unique.

La température et la pression de saturation

Température de saturation (T_{sat}): température à laquelle une substance pure change de phase, sujette à une certaine pression. Donc: $T_{sat} = f(P)$

On peut avoir de la vapeur même à des températures très basses en faisant baisser la pression.

Exemple:

$T=0^{\circ}\text{C}$ correspond $P_{sat} = 0.61\text{kPa}$.

D'autre part, pour des températures élevées, on a besoin des pressions très élevées.

Exemple:

$T=250^{\circ}\text{C}$ correspond $P_{sat} = 3976\text{ kPa}$.

TABLEAU 3.1

Pression de saturation de l'eau pour différentes températures

Température (en degrés Celsius)	Pression de saturation (en kilopascals)
-10	0,26
-5	0,40
0	0,61
5	0,87
10	1,23
15	1,71
20	2,34
25	3,17
30	4,25
40	7,39
50	12,35
100	101,4
150	476,2
200	1 555
250	3 976
300	8 588

TABLEAU 3.2

Variation de la pression atmosphérique et de la température d'ébullition en fonction de l'altitude

Élévation (en mètres)	Pression atmosphérique (en kilopascals)	Température d'ébullition (en °C)
0	101,33	100,0
1 000	89,55	96,5
2 000	79,50	93,3
5 000	54,05	83,3
10 000	26,50	66,3
20 000	5,53	34,7

À des hautes altitudes, on a juste besoin des températures moins élevées pour avoir de la vapeur.

Exp: pour une altitude de **20 km**: $T_{sat} = 34.7^{\circ}\text{C}$

Diagramme P-v

Si on prenait l'eau dans un cylindre/piston et on varie la pression lentement en enlevant des petites masses sur le piston, tout en gardant la température constante en laissant l'eau échanger de la chaleur avec l'environnement

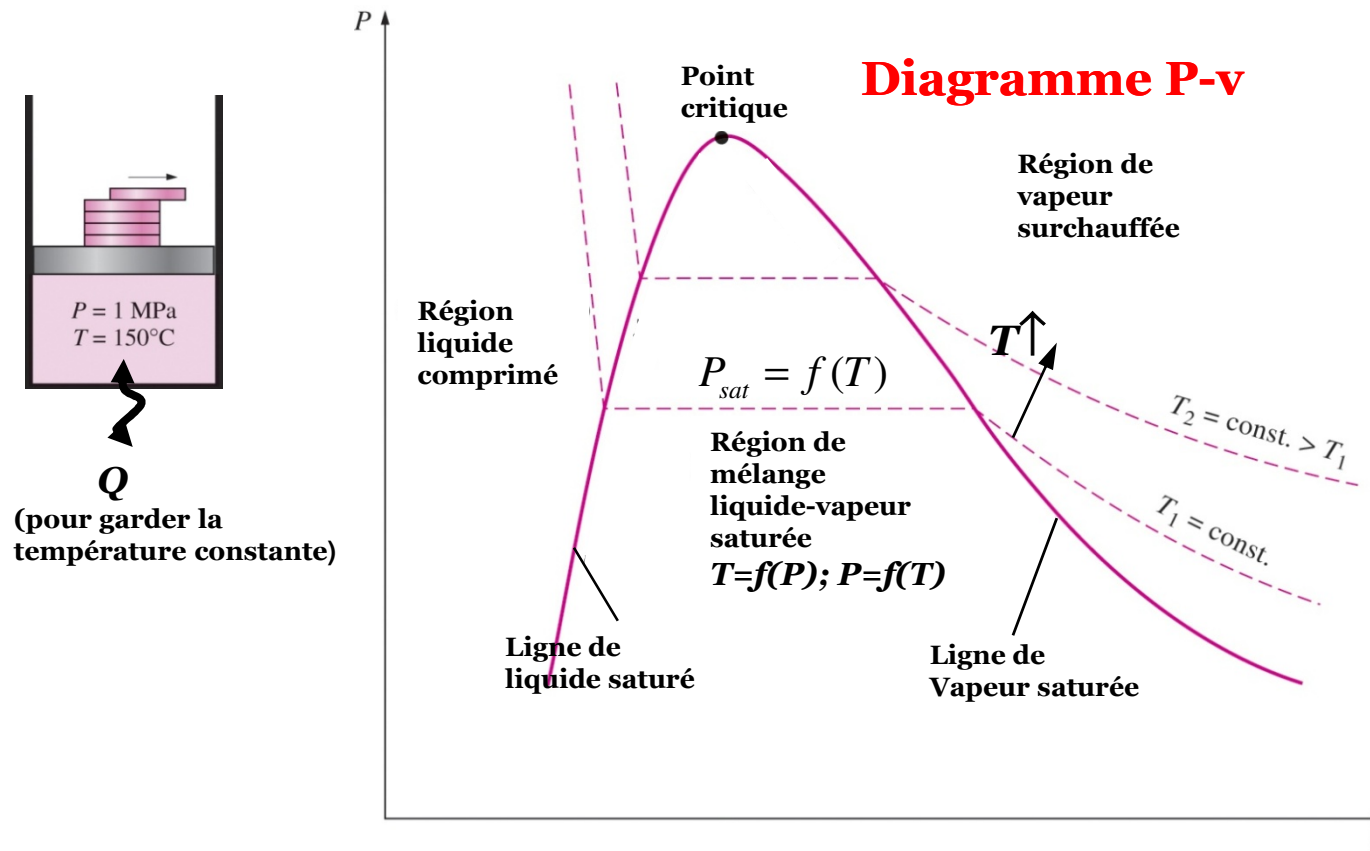


Diagramme P-v

Pression de saturation (P_{sat}): pression à laquelle une substance pure change de phase, sujette à une certaine température.

$$P_{sat} = f(T)$$

On peut inclure la phase solide dans le diagramme P-v:

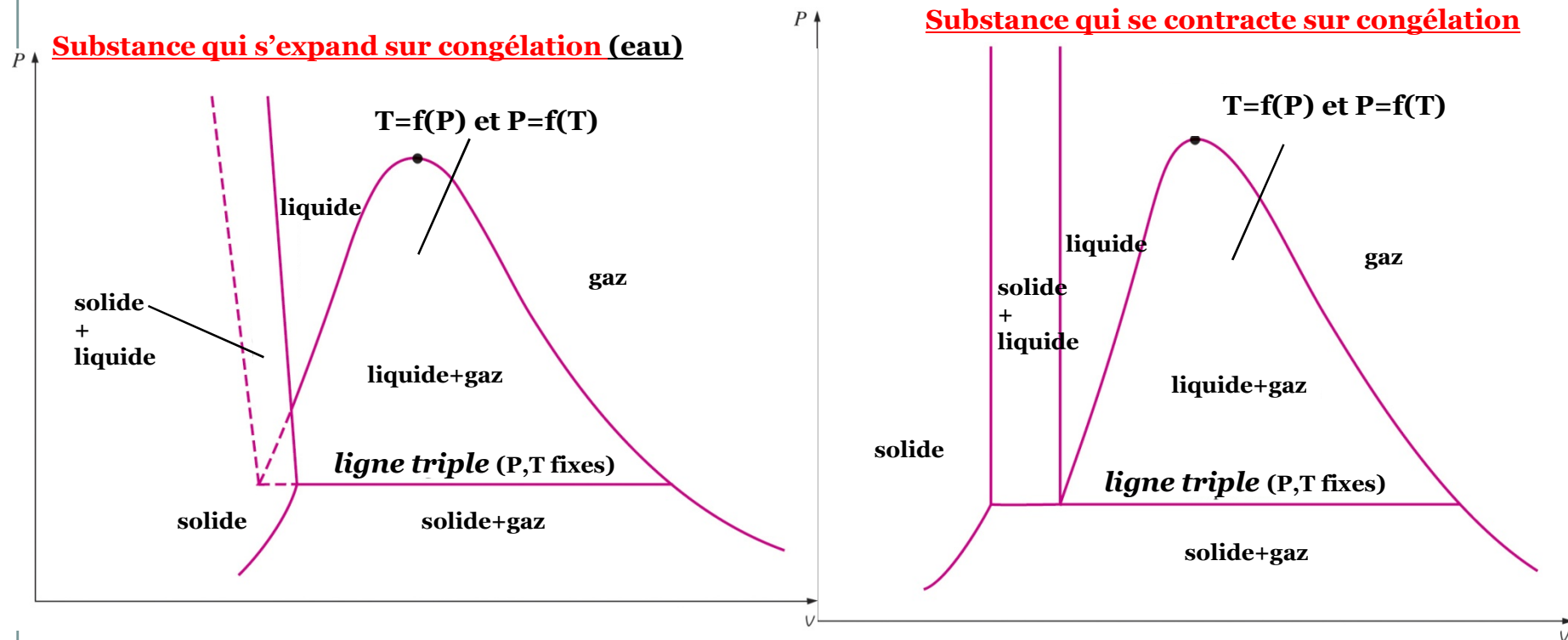
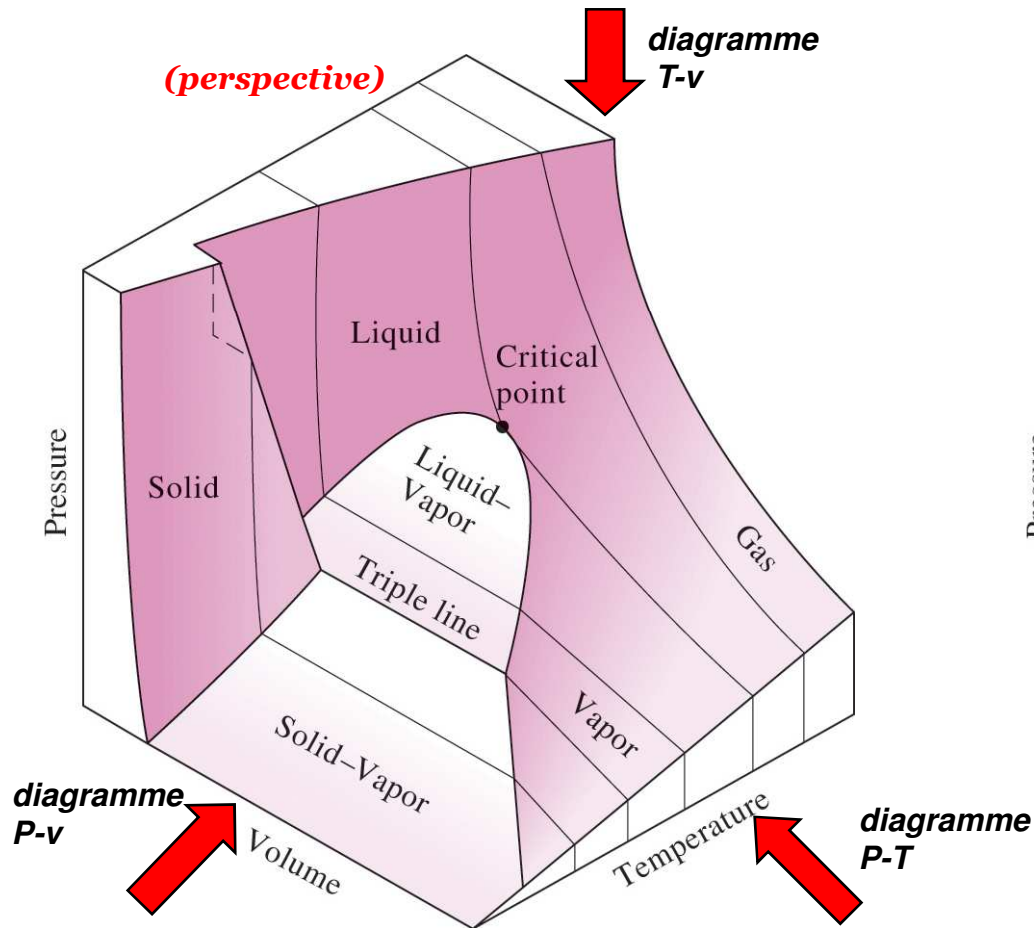


Diagramme P-v-T

En mettant les diagrammes T-v et P-v ensemble en 3-D, on obtient le diagramme P-v-T

Substance qui s'expand sur congélation



Substance qui se contracte sur congélation

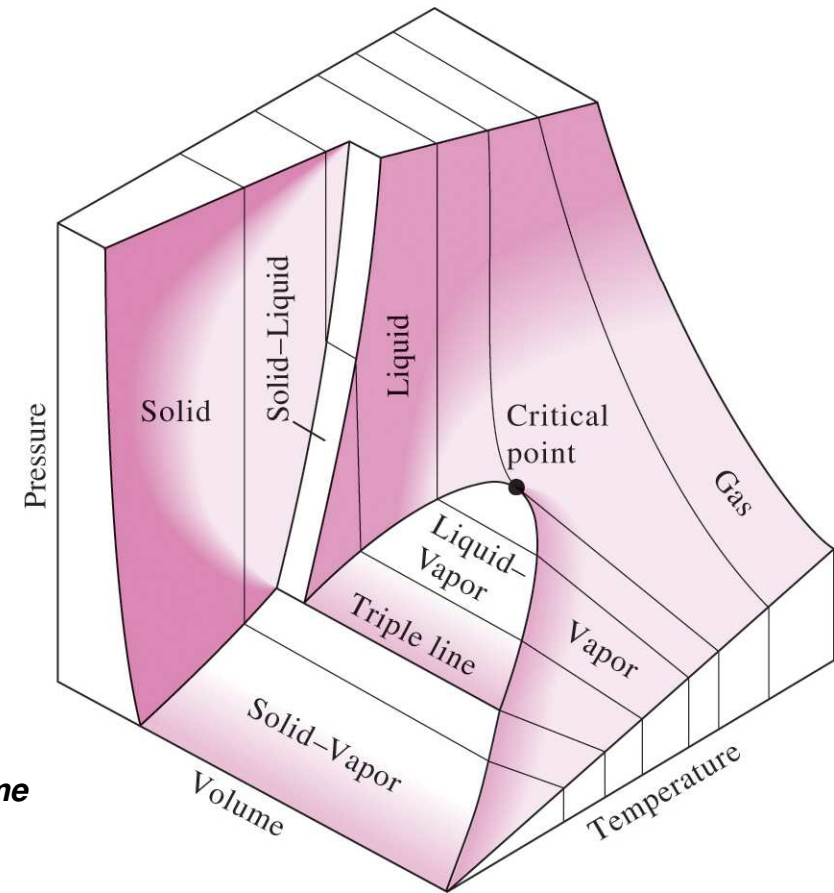
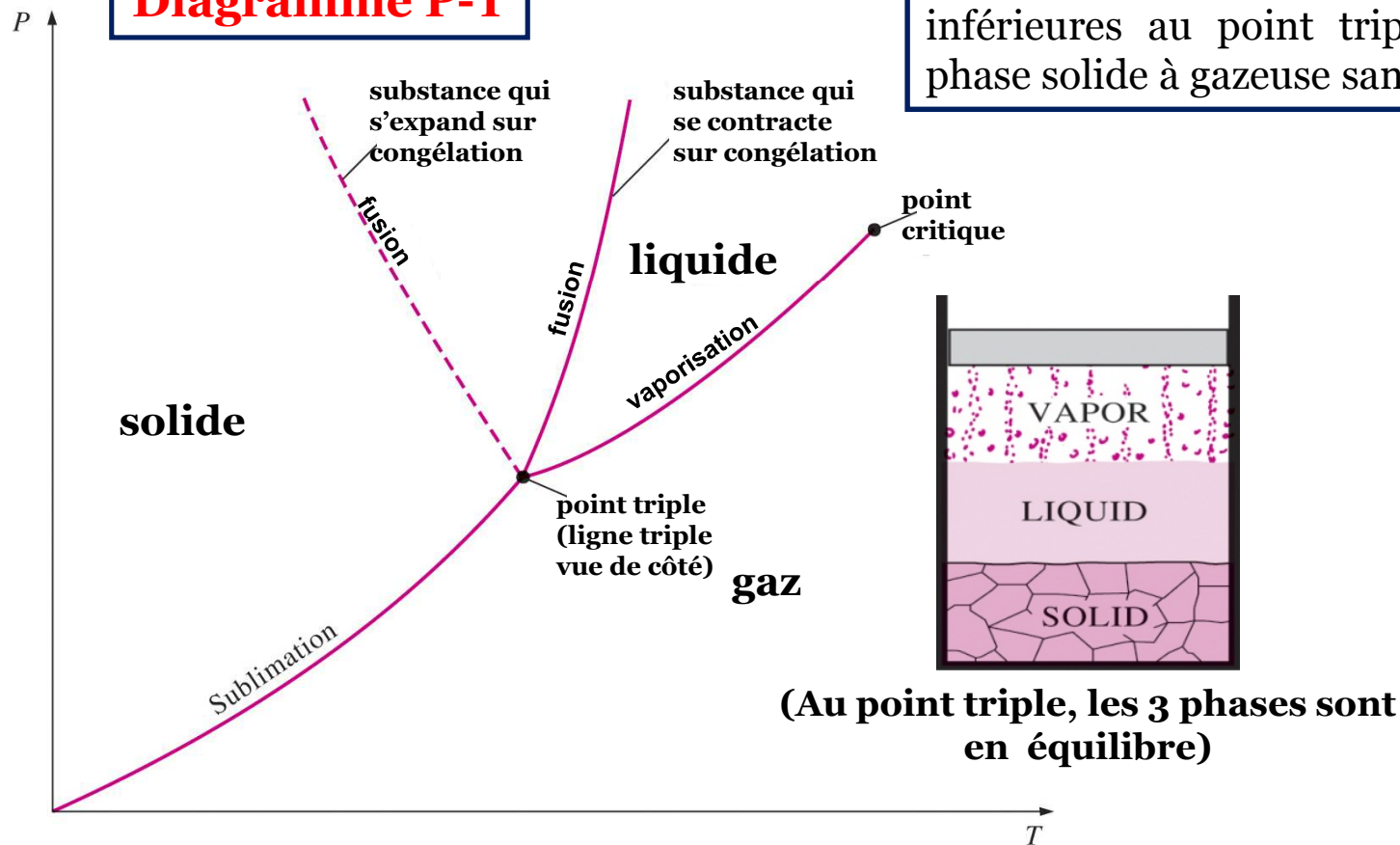


Diagramme P-T

Diagramme P-v-T vu de côté

Diagramme P-T



Sublimation: Pour des pressions inférieures au point triple, passage de la phase solide à gazeuse sans fondre.

Propriétés thermodynamiques

1) P, T, v et ρ : **déjà vu**

b) **Enthalpie (h)**:

$$H = U + PV \quad \text{kJ (forme extensive)}$$

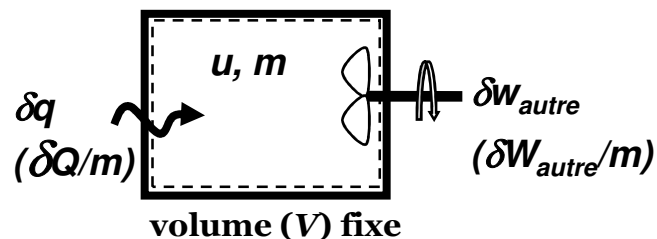
$$h = u + Pv \quad \text{kJ/kg (forme intensive)}$$

3) Chaleurs massiques (C_p , C_v): énergie requise pour augmenter la température d'une unité de masse d'une substance de un degré.

Alternativement, c'est une mesure de la capacité de stockage d'énergie d'une substance.

Deux types de chaleur massique:

1) **chaleur massique à volume constant (C_v)**



$$\Delta e_{\text{sys}} = e_{\text{in}} - e_{\text{out}}$$

$$\Delta u + \cancel{\Delta e_c} + \cancel{\Delta e_p} = \underbrace{\delta q + \delta w_{\text{autre}}}_{\text{énergie transférée au système}}$$

énergie transférée au système

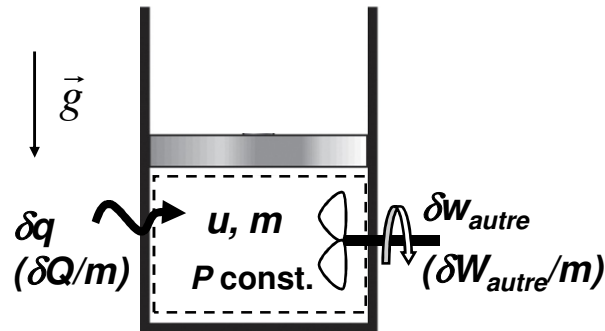
Propriétés thermodynamiques

$$c_v = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\overbrace{\delta q + \delta w_{\text{autre}}}^{\text{Énergie fournie}}}{\Delta T} \Big|_{V_{\text{const.}}} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\overbrace{\Delta u}^{\text{Stockage d'énergie}}}{\Delta T} \Big|_{V_{\text{const.}}} \equiv \frac{\partial u}{\partial T} \Big|_V$$

$$c_v = \frac{\partial u}{\partial T} \Big|_V$$

(changement d'**énergie interne** avec T en gardant le volume constant)

Chaleur massique à pression constante (C_p):



$$\begin{aligned} \Delta e_{\text{sys}} &= e_{\text{in}} - e_{\text{out}} \\ \Delta u + \cancel{\Delta e_c} + \cancel{\Delta e_p} &= \delta q + \delta w_{\text{autre}} - P\Delta v \\ \underbrace{\delta q + \delta w_{\text{autre}}}_{\text{Énergie transférée au système}} &= \Delta u + P\Delta v = \Delta(u + Pv) \equiv \Delta h \end{aligned}$$

$$c_p = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\delta q + \delta w_{\text{autre}}}{\Delta T} \Big|_{P_{\text{const.}}} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta T} \Big|_{P_{\text{const.}}} \equiv \frac{\partial h}{\partial T} \Big|_P$$

$$c_p = \frac{\partial h}{\partial T} \Big|_P = \text{changement d'enthalpie avec } T \text{ en gardant la pression constante}$$

Propriétés thermodynamiques

Notes:

- ✦ C_v et C_p sont exprimées en terme d'autres propriétés (h, u, T, v, P). Par conséquent, C_v et C_p sont elles mêmes des propriétés, c'est-à-dire dépendantes de l'état et indépendantes de l'évolution)
- ✦ Unités de C_v et C_p est [KJ/kg*K]
- ✦ $C_p > C_v$ car une partie de l'énergie fournie va au travail de frontière $P\Delta v$
- ✦ Pour une substance incompressible (bonne approximation pour les liquides et solides), le volume spécifique (v) reste constante ($\Delta v = 0$) et u est fonction de T seulement, donc:

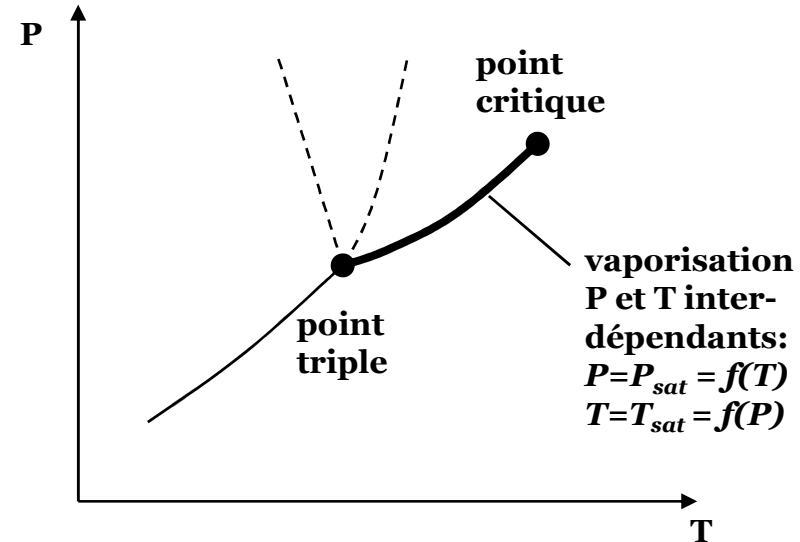
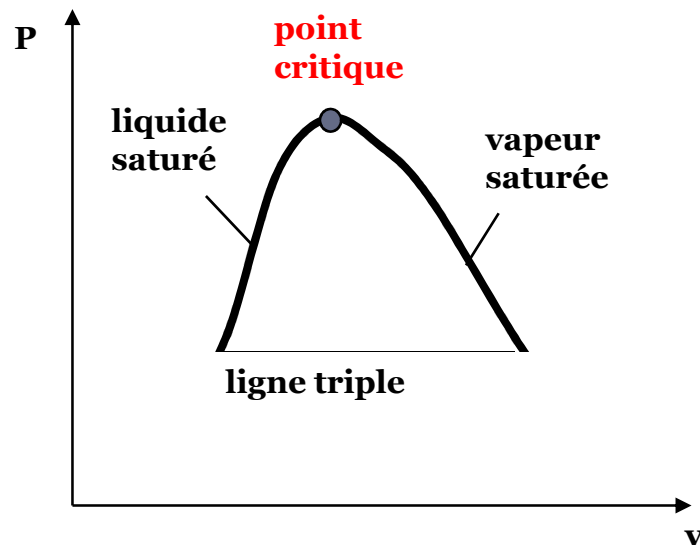
$$P\Delta v = 0 \rightarrow c_v = c_p = c = \frac{du}{dT}$$

Tables des propriétés

d) Tables de propriétés:

Dans la majorité des cas, la relation entre les propriétés thermodynamique est complexe. Pour cela, les propriétés sont mesurées et mises sous formes des tables.

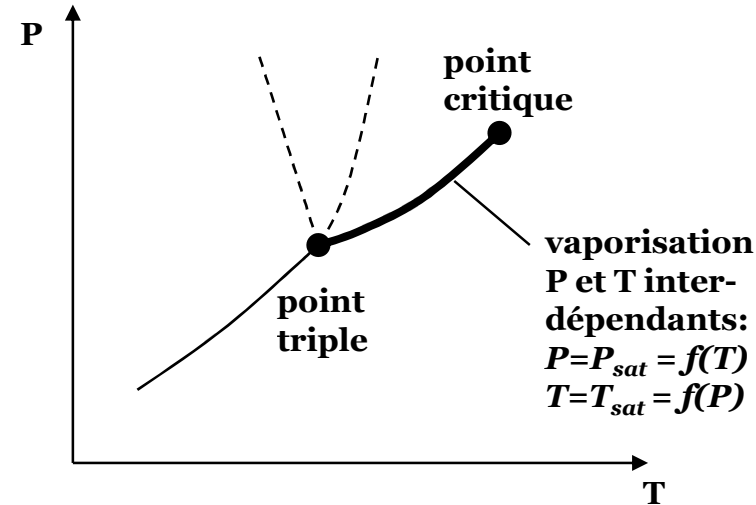
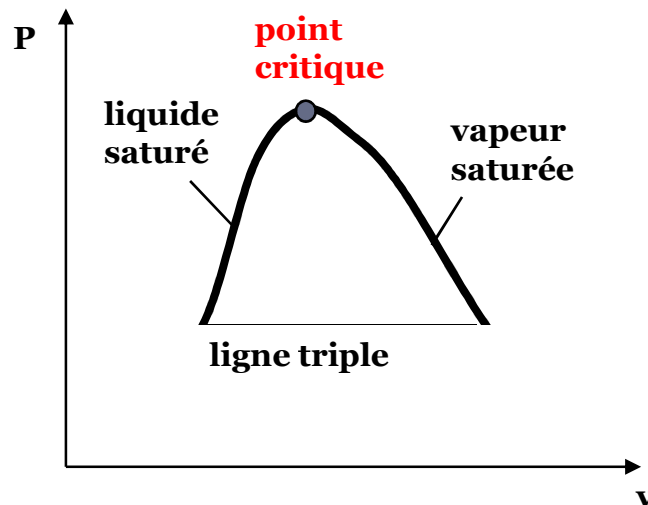
1) Liquides et vapeurs saturés



- ✓ Pour une valeur de T donnée, les tables donnent P_{sat} et les autres propriétés
- ✓ Pour une valeur de P donnée, les tables donnent T_{sat} et les autres propriétés

Tables des propriétés

1) Liquides et vapeurs saturés



propriétés données:

v_f et v_g : volume spécifique du liquide saturé et de la vapeur saturée, respectivement.

u_f et u_g : énergie interne spécifique du liquide saturé et de la vapeur saturée, respectivement.

h_f et h_g : enthalpie spécifique du liquide saturé et de la vapeur saturée, respectivement.

s_f et s_g : entropie spécifique du liquide saturé et de la vapeur saturée, respectivement.

u_{fg} , h_{fg} et s_{fg}

où $(\text{propriété})_{fg} = (\text{propriété})_g \text{ (vapeur saturée)} - (\text{propriété})_f \text{ (liquide saturé)}$

Tables des propriétés

1) Liquides et vapeurs saturés

- ✓ Pour une valeur de T donnée, les tables donnent P_{sat} et les autres propriétés
- ✓ Pour une valeur de P donnée, les tables donnent T_{sat} et les autres propriétés

Table A4 et A5 pour l'eau

Vapeur d'eau à saturation: température A-4

TABLE A.4

Variables de la vapeur d'eau saturée: table de la température.

Température $T, ^\circ\text{C}$	Pression de saturation $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$	Volume massique m^3/kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg			Entropie $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$		
		Liquide saturé v_f	Vapeur saturée v_g	Liquide saturé u_f	Évapo- ration u_{fg}	Vapeur saturée u_g	Liquide saturé h_f	Évapo- ration h_{fg}	Vapeur saturée h_g	Liquide saturé s_f	Évapo- ration s_{fg}	Vapeur saturée s_g
0,01	0,6117	0,001000	206,00	0,000	2 374,9	2 374,9	0,001	2 500,9	2 500,9	0,0000	9,1556	9,1556
5	0,8725	0,001000	147,03	21,019	2 360,8	2 381,8	21,020	2 489,1	2 510,1	0,0763	8,9487	9,0249
10	1,2281	0,001000	106,32	42,020	2 346,6	2 388,7	42,022	2 477,2	2 519,2	0,1511	8,7488	8,8999
15	1,7057	0,001001	77,885	62,980	2 332,5	2 395,5	62,982	2 465,4	2 528,3	0,2245	8,5559	8,7803
20	2,3392	0,001002	57,762	83,913	2 318,4	2 402,3	83,915	2 453,5	2 537,4	0,2965	8,3696	8,6661
25	3,1698	0,001003	43,340	104,83	2 304,3	2 409,1	104,83	2 441,7	2 546,5	0,3672	8,1895	8,5567
30	4,2469	0,001004	32,879	125,73	2 290,2	2 415,9	125,74	2 429,8	2 555,6	0,4368	8,0152	8,4520
35	5,6291	0,001006	25,205	146,63	2 276,0	2 422,7	146,64	2 417,9	2 564,6	0,5051	7,8466	8,3517
40	7,3851	0,001008	19,515	167,53	2 261,9	2 429,4	167,53	2 406,0	2 573,5	0,5724	7,6832	8,2556
45	9,5953	0,001010	15,251	188,43	2 247,7	2 436,1	188,44	2 394,0	2 582,4	0,6386	7,5247	8,1633

Tables des propriétés

1) Liquides et vapeurs saturés

Table A4 et A5 pour l'eau

Vapeur d'eau à saturation: pression A-5

TABLE A.5

Variables de la vapeur d'eau saturée: table de la pression.

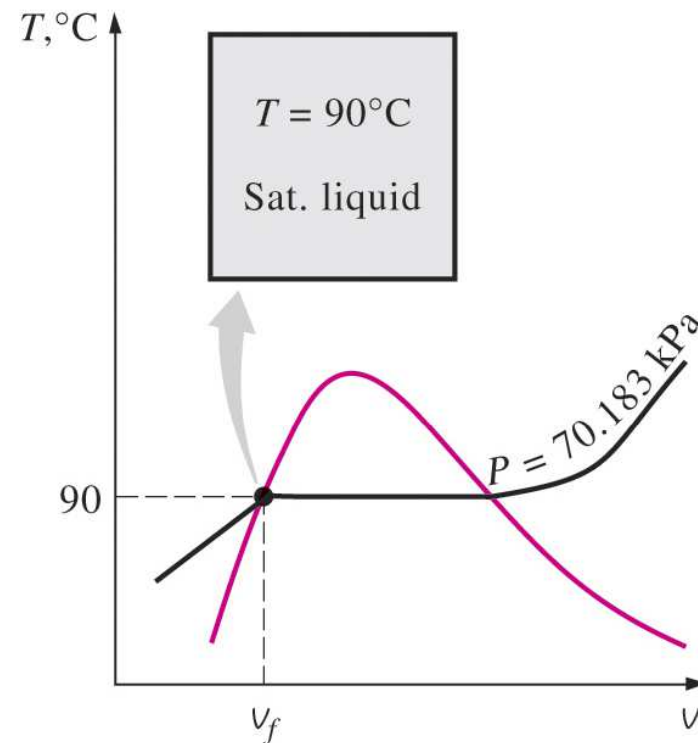
Pression P , kPa	Tempé- rature de saturation T_{sat} , °C	Volume massique m^3/kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg			Entropie $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$		
		Liquide saturé v_f	Vapeur saturée v_g	Liquide saturé u_f	Évapo- ration u_{fg}	Vapeur saturée u_g	Liquide saturé h_f	Évapo- ration h_{fg}	Vapeur saturée h_g	Liquide saturé s_f	Évapo- ration s_{fg}	Vapeur saturée s_g
1,0	6,97	0,001000	129,19	29,302	2 355,2	2 384,5	29,303	2 484,4	2 513,7	0,1059	8,8690	8,9749
1,5	13,02	0,001001	87,964	54,686	2 338,1	2 392,8	54,688	2 470,1	2 524,7	0,1956	8,6314	8,8270
2,0	17,50	0,001001	66,990	73,431	2 325,5	2 398,9	73,433	2 459,5	2 532,9	0,2606	8,4621	8,7227
2,5	21,08	0,001002	54,242	88,422	2 315,4	2 403,8	88,424	2 451,0	2 539,4	0,3118	8,3302	8,6421
3,0	24,08	0,001003	45,654	100,98	2 306,9	2 407,9	100,98	2 443,9	2 544,8	0,3543	8,2222	8,5765
4,0	28,96	0,001004	34,791	121,39	2 293,1	2 414,5	121,39	2 432,3	2 553,7	0,4224	8,0510	8,4734
5,0	32,87	0,001005	28,185	137,75	2 282,1	2 419,8	137,75	2 423,0	2 560,7	0,4762	7,9176	8,3938
7,5	40,29	0,001008	19,233	168,74	2 261,1	2 429,8	168,75	2 405,3	2 574,0	0,5763	7,6738	8,2501
10	45,81	0,001010	14,670	191,79	2 245,4	2 437,2	191,81	2 392,1	2 583,9	0,6492	7,4996	8,1488
15	53,97	0,001014	10,020	225,93	2 222,1	2 448,0	225,94	2 372,3	2 598,3	0,7549	7,2522	8,0071

Exemple 1

Un réservoir rigide renferme 50kg d'eau liquide saturée à 90°C .

- Déterminez la pression dans le réservoir ainsi que son volume.

Solution (en classe)

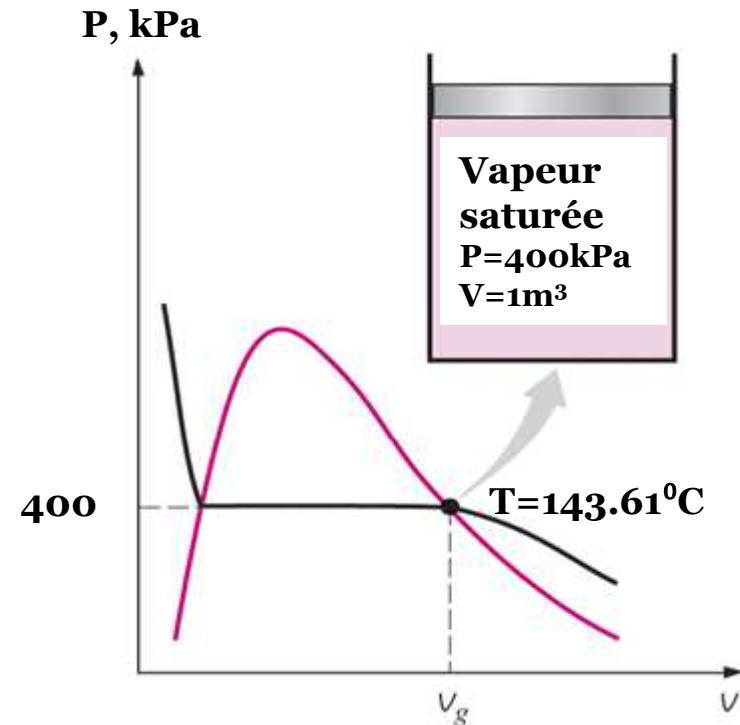


Exemple 2

Un système piston-cylindre contient 1m^3 de vapeur saturée à 400kPa .

- La température et la masse de vapeur dans le système.

Solution (en classe)

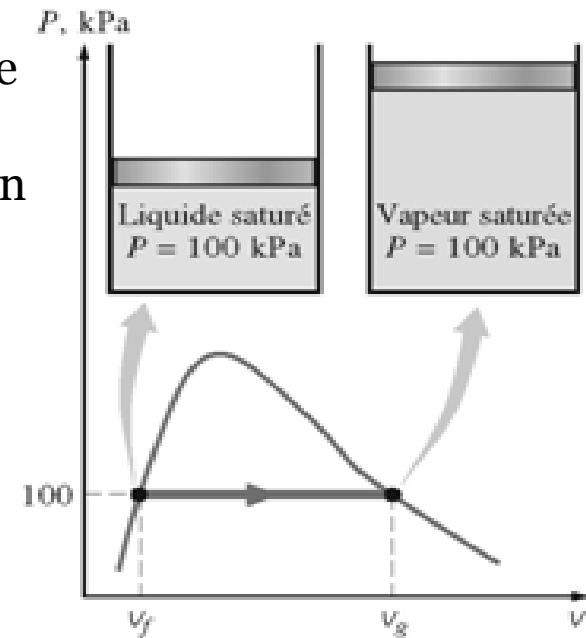


Exemple 3

Sous une pression de 100kPa, 200g d'eau liquide saturée sont évaporés. Déterminez:

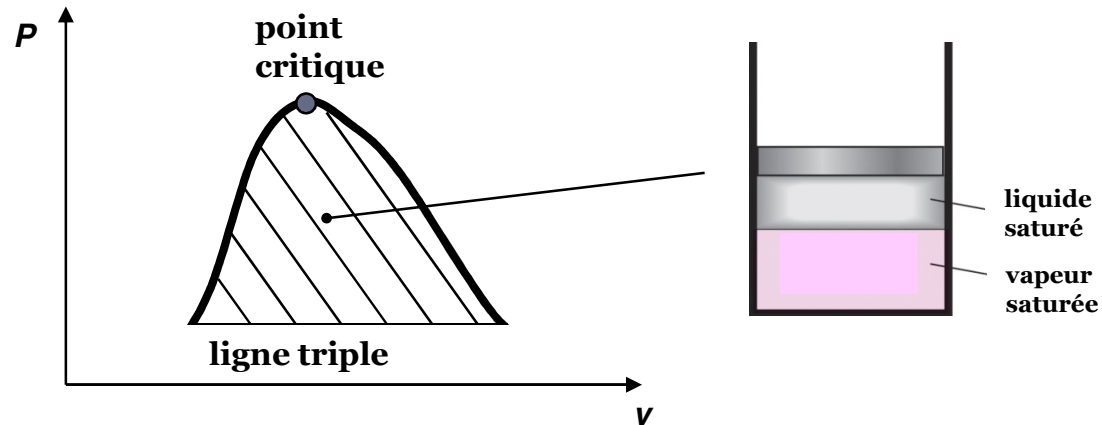
- 1) La variation du volume du fluide pendant l'évolution
- 2) La quantité d'énergie transmise à l'eau

Solution (en classe)



Tables des propriétés

2) Mélanges liquide/vapeur saturés



✓ Pour obtenir une propriété extensive Y (par exemple V , U , H ou S) de ce mélange composé de deux phases, on somme la propriété Y des deux phases et on divise par la masse totale du mélange pour obtenir la propriété intensive y (Y/m) du mélange.

$$\begin{array}{c}
 \text{liquide saturé} \quad \text{vapeur saturée} \\
 \downarrow \quad \downarrow \\
 V_{total} = V_f + V_g
 \end{array}$$

**exple: volume spécifique
du mélange ($Y=V$)**

$$m_{total} v_{total} = m_f v_f + m_g v_g \rightarrow m_{total} = m_f + m_g$$

$$v_{total} = \frac{m_f}{m_{total}} v_f + \frac{m_g}{m_{total}} v_g = \left(1 - \frac{m_g}{m_{total}}\right) v_f + \frac{m_g}{m_{total}} v_g$$

Tables des propriétés

2) Mélanges liquide/vapeur saturés

$$\underline{\text{Titre}} = x = \frac{\text{Masse de vapeur}}{\text{Masse totale}} = \frac{m_g}{m_{\text{totale}}} = \frac{m_g}{m_f + m_g} \rightarrow \begin{cases} x = 0 : \text{liquide saturé} \\ 0 < x < 1 : \text{mélange saturé} \\ x = 1 : \text{vapeur saturée} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \text{Volume spécifique du mélange} : v = (1-x)v_f + xv_g$$

Pour une **propriété intensive y**:

$$y = (1-x)y_f + xy_g$$

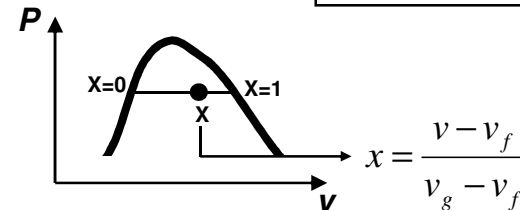
ou connaissant y on peut trouver x:

$$x = \frac{y - y_f}{y_g - y_f}$$

$$y = y_f + xy_{fg}$$

où

$$y_{fg} \equiv y_g - y_f$$



notes: - $0 < x < 1$, donc $y_f < y < y_g$

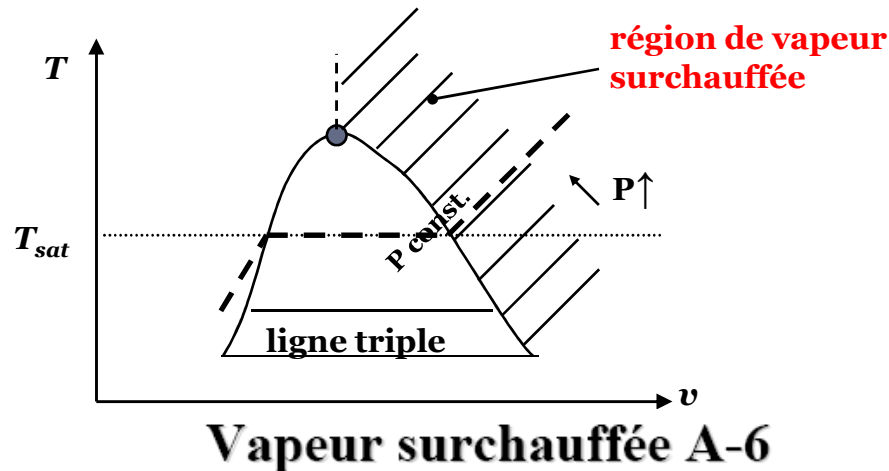
- Les valeurs de y_f et y_g viennent des tables de liquide/vapeur saturé

- Selon le postulat d'état, dans ce cas on aurait besoin de deux propriétés indépendantes pour décrire un état:

- Liquide comprimé ou vapeur surchauffée : **P et T** (indépendantes)
- Mélange saturé: **P ou T** (inter-dépendantes) **et x**.

Tables des propriétés

3) vapeur surchauffée



- P & T indépendantes
- $P < P_{sat}$ pour une T donnée
- $T > T_{sat}$ pour une P donnée
- $v > v_g$ pour une P ou T donnée
- $u > u_g$ pour une P ou T donnée
- $h > h_g$ pour une P ou T donnée
- $s > s_g$ pour une P ou T donnée

TABLE A.6

Variables de la vapeur d'eau surchauffée.

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
P = 0,01 MPa (45,81 °C)*				P = 0,05 MPa (81,32 °C)				P = 0,10 MPa (99,61 °C)				
Sat.:	14,670	2 437,2	2 583,9	8,1488	3,2403	2 483,2	2 645,2	7,5931	1,6941	2 505,6	2 675,0	7,3589
50	14,867	2 443,3	2 592,0	8,1741								
100	17,196	2 515,5	2 687,5	8,4489	3,4187	2 511,5	2 682,4	7,6953	1,6959	2 506,2	2 675,8	7,3611
150	19,513	2 587,9	2 783,0	8,6893	3,8897	2 585,7	2 780,2	7,9413	1,9367	2 582,9	2 776,6	7,6148
200	21,826	2 661,4	2 879,6	8,9049	4,3562	2 660,0	2 877,8	8,1592	2,1724	2 658,2	2 875,5	7,8356
250	24,136	2 736,1	2 977,5	9,1015	4,8206	2 735,1	2 976,2	8,3568	2,4062	2 733,9	2 974,5	8,0346
300	26,446	2 812,3	3 076,7	9,2827	5,2841	2 811,6	3 075,8	8,5387	2,6389	2 810,7	3 074,5	8,2172
400	31,063	2 969,3	3 280,0	9,6094	6,2094	2 968,9	3 279,3	8,8659	3,1027	2 968,3	3 278,6	8,5452
500	35,680	3 132,9	3 489,7	9,8998	7,1338	3 132,6	3 489,3	9,1566	3,5655	3 132,2	3 488,7	8,8362
600	40,296	3 303,3	3 706,3	10,1631	8,0577	3 303,1	3 706,0	9,4201	4,0279	3 302,8	3 705,6	9,0999
700	44,911	3 480,8	3 929,9	10,4056	8,9813	3 480,6	3 929,7	9,6626	4,4900	3 480,4	3 929,4	9,3424
800	49,527	3 665,4	4 160,6	10,6312	9,9047	3 665,2	4 160,4	9,8883	4,9519	3 665,0	4 160,2	9,5682
900	54,143	3 856,9	4 398,3	10,8429	10,8280	3 856,8	4 398,2	10,1000	5,4137	3 856,7	4 398,0	9,7800
1 000	58,758	4 055,3	4 642,8	11,0429	11,7513	4 055,2	4 642,7	10,3000	5,8755	4 055,0	4 642,6	9,9800
1 100	63,373	4 260,0	4 893,8	11,2326	12,6745	4 259,9	4 893,7	10,4897	6,3372	4 259,8	4 893,6	10,1698
1 200	67,989	4 470,9	5 150,8	11,4132	13,5977	4 470,8	5 150,7	10,6704	6,7988	4 470,7	5 150,6	10,3504
1 300	72,604	4 687,4	5 413,4	11,5857	14,5209	4 687,3	5 413,3	10,8429	7,2605	4 687,2	5 413,3	10,5229

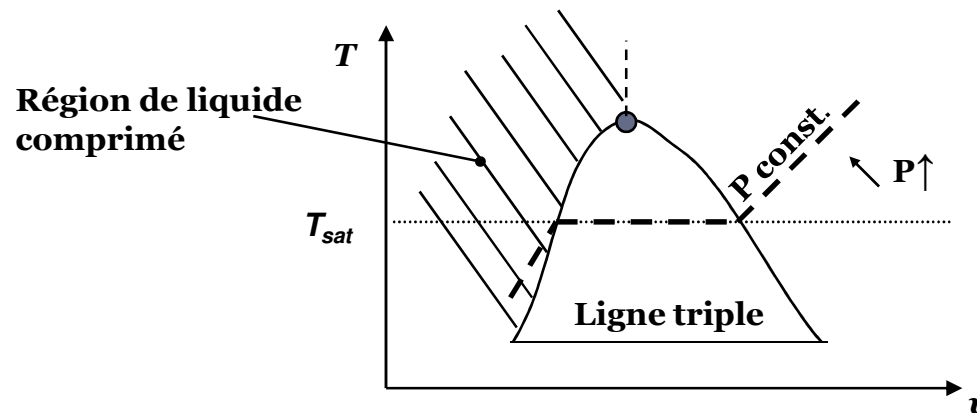
Propriété $y = f(P, T)$: tabulation des propriétés v, u, h, s versus P et T qui nécessite parfois des interpolations en 2-D.

exemple:
C & B, tables A-6 pour H₂O

Tables des propriétés

4) Liquide comprimé

- P & T indépendantes
- $P > P_{sat}$ pour une T donnée
- $T < T_{sat}$ pour une P donnée
- $v < v_f$ pour une P ou T donnée
- $u < u_f$ pour une P ou T donnée
- $h < h_f$ pour une P ou T donnée
- $s < s_f$ pour une P ou T donnée



Propriété $y = f(P, T)$: tabulation des propriétés v , u , h , s versus P et T qui nécessite parfois des interpolations en 2-D. (Table semblable à celle pour la vapeur surchauffée.)
exemple: C & B, tables A-7 pour H_2O

Cependant, les données pour **les liquides comprimés** sont rares. En leur absence, vu que les propriétés des liquides comprimés sont relativement insensibles à la pression, on peut faire l'approximation:

$$y(P, T) \approx y_f(T)$$

Note : exception possible: $y=h$ (enthalpie), car $h=u+Pv$. Dans ce cas, certains approximent parfois h avec :

$$h(P, T) \approx h_f(T) + v_f(T) * (P - P_{sat}(T))$$

Tables des propriétés

4) Liquide comprimé

Liquide comprimé A-7

TABLE A.7

Variables de l'eau comprimée.

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 5 \text{ MPa (263,94}^\circ\text{C)}$				$P = 10 \text{ MPa (311,00}^\circ\text{C)}$				$P = 15 \text{ MPa (342,16}^\circ\text{C)}$				
Sat.	0,0012862	1 148,1	1 154,5	2,9207	0,0014522	1 393,3	1 407,9	3,3603	0,0016572	1 585,5	1 610,3	3,6848
0	0,0009977	0,04	5,03	0,0001	0,0009952	0,12	10,07	0,0003	0,0009928	0,18	15,07	0,0004
20	0,0009996	83,61	88,61	0,2954	0,0009973	83,31	93,28	0,2943	0,0009951	83,01	97,93	0,2932
40	0,0010057	166,92	171,95	0,5705	0,0010035	166,33	176,37	0,5685	0,0010013	165,75	180,77	0,5666
60	0,0010149	250,29	255,36	0,8287	0,0010127	249,43	259,55	0,8260	0,0010105	248,58	263,74	0,8234
80	0,0010267	333,82	338,96	1,0723	0,0010244	332,69	342,94	1,0691	0,0010221	331,59	346,92	1,0659
100	0,0010410	417,65	422,85	1,3034	0,0010385	416,23	426,62	1,2996	0,0010361	414,85	430,39	1,2958
120	0,0010576	501,91	507,19	1,5236	0,0010549	500,18	510,73	1,5191	0,0010522	498,50	514,28	1,5148
140	0,0010769	586,80	592,18	1,7344	0,0010738	584,72	595,45	1,7293	0,0010708	582,69	598,75	1,7243
160	0,0010988	672,55	678,04	1,9374	0,0010954	670,06	681,01	1,9316	0,0010920	667,63	684,01	1,9259
180	0,0011240	759,47	765,09	2,1338	0,0011200	756,48	767,68	2,1271	0,0011160	753,58	770,32	2,1206
200	0,0011531	847,92	853,68	2,3251	0,0011482	844,32	855,80	2,3174	0,0011435	840,84	858,00	2,3100
220	0,0011868	938,39	944,32	2,5127	0,0011809	934,01	945,82	2,5037	0,0011752	929,81	947,43	2,4951
240	0,0012268	1 031,6	1 037,7	2,6983	0,0012192	1 026,2	1 038,3	2,6876	0,0012121	1 021,0	1 039,2	2,6774
260	0,0012755	1 128,5	1 134,9	2,8841	0,0012653	1 121,6	1 134,3	2,8710	0,0012560	1 115,1	1 134,0	2,8586
280					0,0013226	1 221,8	1 235,0	3,0565	0,0013096	1 213,4	1 233,0	3,0410
300					0,0013980	1 329,4	1 343,3	3,2488	0,0013783	1 317,6	1 338,3	3,2279
320									0,0014733	1 431,9	1 454,0	3,4263
340									0,0016311	1 567,9	1 592,4	3,6555

Exemple: C & B, tables A-7 pour H₂O

Tables des propriétés

Note: u , h , s sont des propriétés dont la valeur est donnée par rapport à une référence.
(seules Δu , Δh , Δs sont significatives). Cette référence peut changer d'une table à l'autre.
Il faut donc faire attention si on utilise des tables de sources différentes.

Tables des propriétés

Interpolation linéaire

Quel est le volume massique de la vapeur surchauffée à 1,0 MPa et 220°C

Température (°C)	Volume massique (m ³ /kg)
200	0.20602
250	0.23275

$$\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{v - v_1}{v_2 - v_1} \Rightarrow \frac{220 - 200}{250 - 200} = \frac{v - 0.20602}{0.23275 - 0.20602}$$
$$\Rightarrow v(220^\circ\text{C}) = 0.21671 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Exemple 4 (Exo. 3.24)

Remplissez le tableau suivant pour l'eau:

T (°C)	P (kPa)	h(kJ/kg)	x	État de la phase
	200		0.7	
140		1800		
	950		0.0	
80	500			
	800	3162.2		

Solution (en classe)

Exemple 5 (Exo. 3.27-2^{ème} édition)

Remplissez le tableau suivant pour le **réfrigérant R-134a**:

T (°C)	P (kPa)	u(kJ/kg)	État de la phase
20		95	
-12			Liq saturé
	400	300	
8	600		

Solution (en classe)

Gaz parfait

Équations d'état : c'est l'équation qui relie qui relie P,v & T (ou d'autres propriétés) d'une substance.

Plusieurs équations d'état existent, du simple au complexe, pour différentes substances et valides dans différentes régions de la surface P-v-T. En leur absence on utilise les tables comme dans la section précédente.

L'équation d'état la plus simple est l'**équation de gaz parfait**:

$$PV = NR_u T \quad \text{où } N : \text{nombre de moles du gaz}$$

$$R_u : \text{constante universelle de gaz (8.31447 KJ/kmol}\cdot\text{K)}$$

Un gaz parfait est un gaz imaginaire qui obéit cette relation. Cependant, à basse pression et haute température (donc basse densité) beaucoup de gaz familiers à basse masse molaire (air, N₂, O₂, H₂, He, Ar, ...) peuvent être approximés par un gaz parfait.

Pour les gaz plus lourds ou dans des régions de P et T où la densité est haute, on devrait utiliser les tables.

exemple: - réfrigérant (élément lourd)

- vapeur d'eau à haute P dans une centrale thermique (haute densité)

Équations d'état pour gaz parfait

Autres formes de l'équation de gaz parfait:

$$PV = NM \frac{R_u}{M} T \quad \text{où } M = \text{masse molaire du gaz}$$

$$PV = mRT \quad \text{où } m = NM = \text{masse du gaz}$$

$$R \equiv \frac{R_u}{M} = \text{constante du gaz (différente pour chaque gaz)}$$

$$Pv = RT \quad \text{où } v = \frac{V}{m} = \text{volume spécifique}$$

$$P = \rho RT \quad \text{où } \rho = \frac{1}{v} = \text{densité}$$

u , h , c_v et c_p pour un gaz parfait

Énergie interne (u): pour un gaz parfait, on peut démontrer analytiquement et expérimentalement que l'énergie interne est seulement fonction de la température, soit :

$$u = u(T)$$

Équations d'état pour gaz parfait

Enthalpie (h):

$$h = u + Pv \rightarrow Pv = RT$$

$$h = u + RT \rightarrow u = u(T)$$

$$h = h(T)$$

Chaleurs massiques (c_v , c_p):

$$c_v \equiv \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v \stackrel{u=u(T)}{=} \frac{du}{dT} = c_v(T)$$

$$c_p \equiv \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p \stackrel{h=h(T)}{=} \frac{dh}{dT} = c_p(T)$$

Donc, pour un changement d'état:

$$\begin{cases} du = c_v dT & \rightarrow \Delta u = u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT \\ dh = c_p dT & \rightarrow \Delta h = h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \end{cases}$$

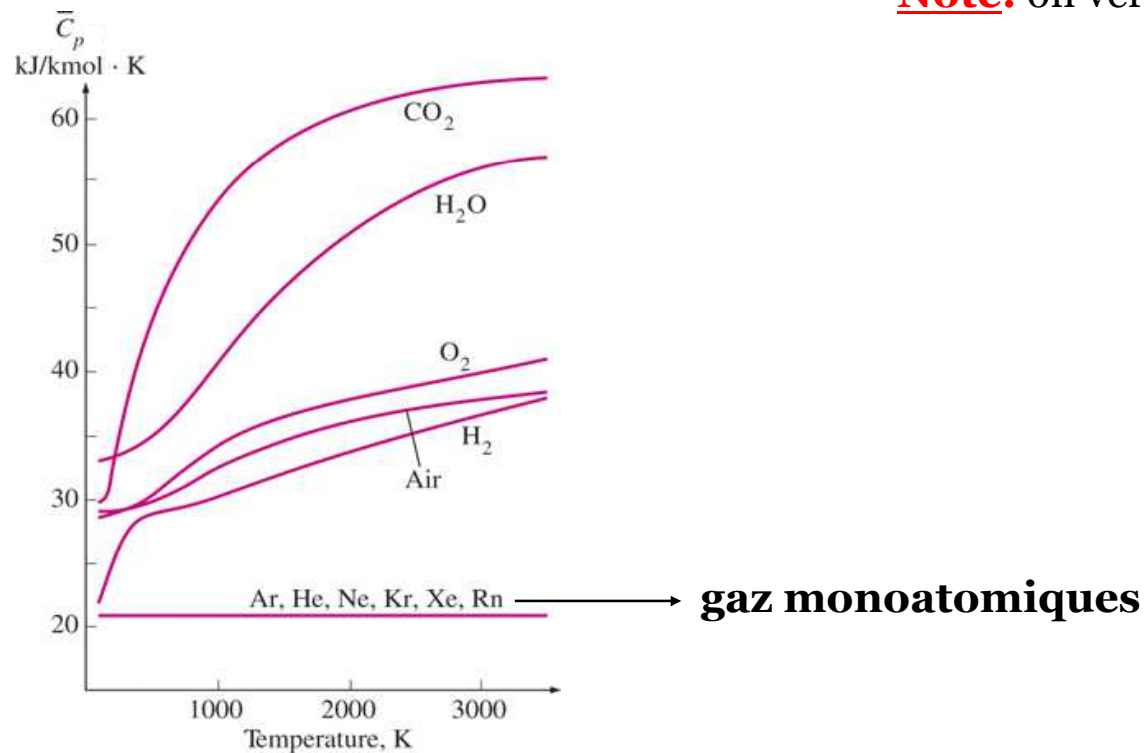
(Notez que ces deux relations s'appliquent pour toute évolution de gaz parfait, pas juste pour celles à v ou P constante.)

Équations d'état pour gaz parfait

Pour intégrer et obtenir Δu et Δh , il faut en principe connaître les fonctions $c_v(T)$ et $c_p(T)$.

Pour les gaz sous des conditions (P basse, T haute) qui permettent de les approximer par un gaz parfait, voici la variation de c_p avec T :

Note: on verra plus loin que $c_v = c_p - R$



Équations d'état pour gaz parfait

Pour une évolution d'un gaz parfait, on peut trouver Δu et Δh , par trois méthodes:

(1) Utiliser les tables de gaz parfait pour chaque gaz où u & h sont obtenu en intégrant, avec les fonctions exactes de $c_v(T)$ et $c_p(T)$:

$$u(T) = \int_{T_{ref}}^T c_v(T) dT$$

$$h(T) = \int_{T_{ref}}^T c_p(T) dT$$

Ceci est la méthode la plus exacte.

Note: T_{ref} est la température à un état de référence arbitrairement choisi

diviser par masse molaire pour obtenir u et h

TABLE A-19

Ideal-gas properties of oxygen, O₂

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K
0	0	0	0
220	6,404	4,575	196.171
230	6,694	4,782	197.461
240	6,984	4,989	198.696
250	7,275	5,197	199.885
260	7,566	5,405	201.027
270	7,858	5,613	202.128
280	8,150	5,822	203.191
290	8,443	6,032	204.218
298	8,682	6,203	205.033
300	8,736	6,242	205.213

état de référence →

Exemple: C & B table A-19 pour O₂ comme gaz parfait

Équations d'état pour gaz parfait

(2) **Utiliser les relations données pour $c_v(T)$ et $c_p(T)$ et intégrer (souvent numériquement avec un ordinateur).** Ces relations peuvent être données sous forme de:

- **Tables:** par exemple C & B, table A-2b

- **polynômes:** par exemple C & B, table A-2c

TABLE A-2

Ideal-gas specific heats of various common gases (

(b) At various temperatures

Temperature, K	c_p	c_v	k
	kJ/kg · K		
<i>Air</i>			
250	1.003	0.716	1.401
300	1.005	0.718	1.400
350	1.008	0.721	1.398
400	1.013	0.726	1.395
450	1.020	0.733	1.391

TABLE A-2

Ideal-gas specific heats of various common gases (Concluded)

(c) As a function of temperature

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

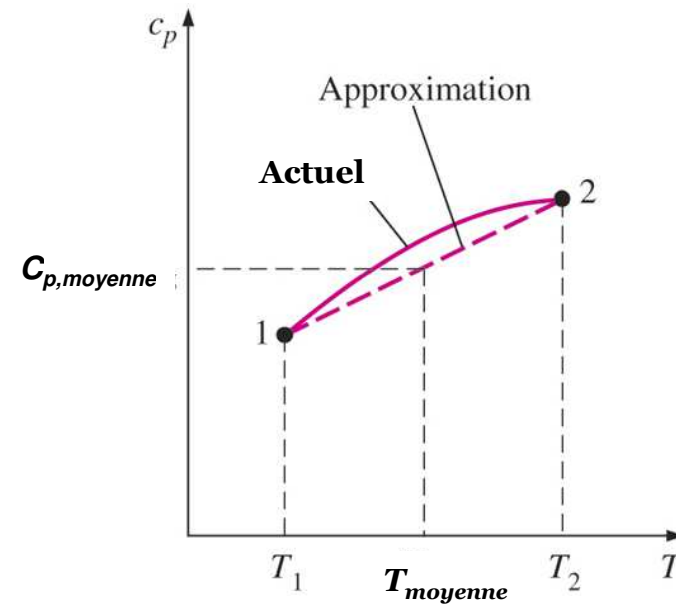
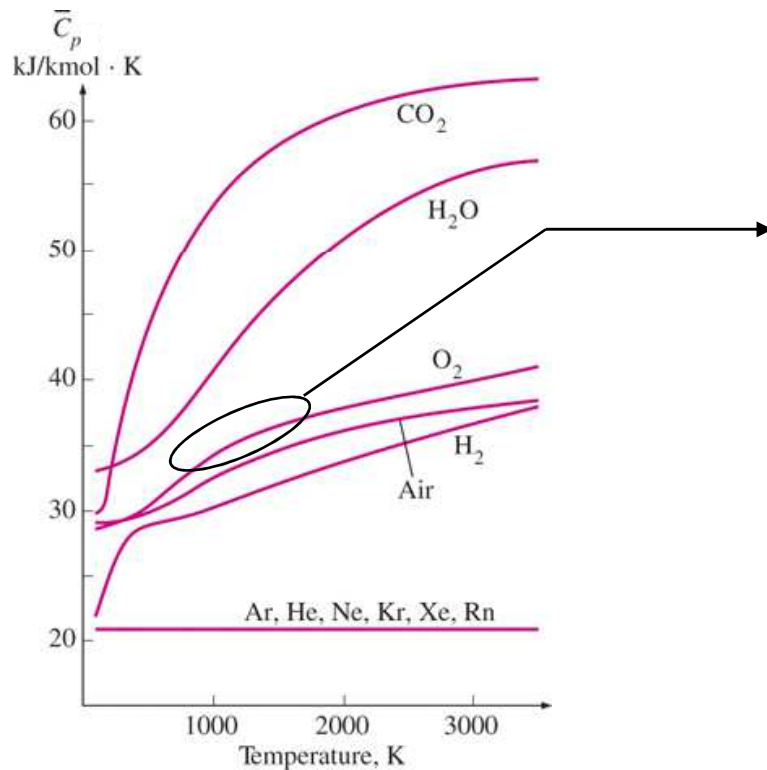
(T in K, c_p in kJ/kmol · K)

diviser par masse molaire pour obtenir c_p et $c_v = c_p - R$

Substance	Formula	a	b	c	d	Temperature range, K	% error	
							Max.	Avg.
Nitrogen	N ₂	28.90	-0.1571×10^{-2}	0.8081×10^{-5}	-2.873×10^{-9}	273–1800	0.59	0.34
Oxygen	O ₂	25.48	1.520×10^{-2}	-0.7155×10^{-5}	1.312×10^{-9}	273–1800	1.19	0.28
Air	—	28.11	0.1967×10^{-2}	0.4802×10^{-5}	-1.966×10^{-9}	273–1800	0.72	0.33

Équations d'état pour gaz parfait

(3) Approximer $c_v(T)$ ou $c_p(T)$ par une valeur constante (préférentiellement la moyenne des valeurs évalués à la température initiale et finale) et intégrer:



$$c_{p,moyenne} = \frac{c_p(T_1) + c_p(T_2)}{2} \rightarrow \Delta h \approx c_{p,moyenne} (T_2 - T_1)$$

$$c_{v,moyenne} = \frac{c_v(T_1) + c_v(T_2)}{2} \rightarrow \Delta u \approx c_{v,moyenne} (T_2 - T_1)$$

Équations d'état pour gaz parfait

Relation entre R, c_v , c_p :

pour un gaz parfait: $h(T) = u(T) + RT$

$$\frac{dh}{dT} = \frac{du}{dT} + R$$

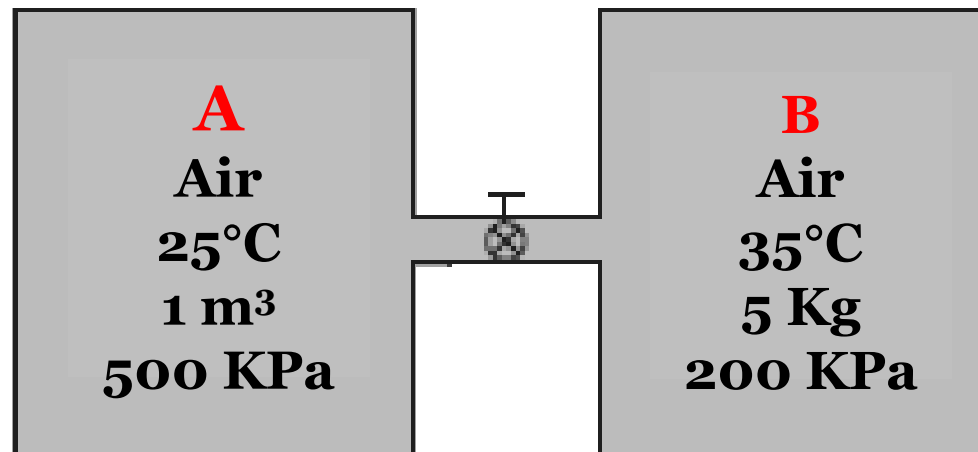
$$c_p = c_v + R$$

une autre propriété: $k \equiv \frac{c_p}{c_v}$ *'rapport des chaleurs massiques'*

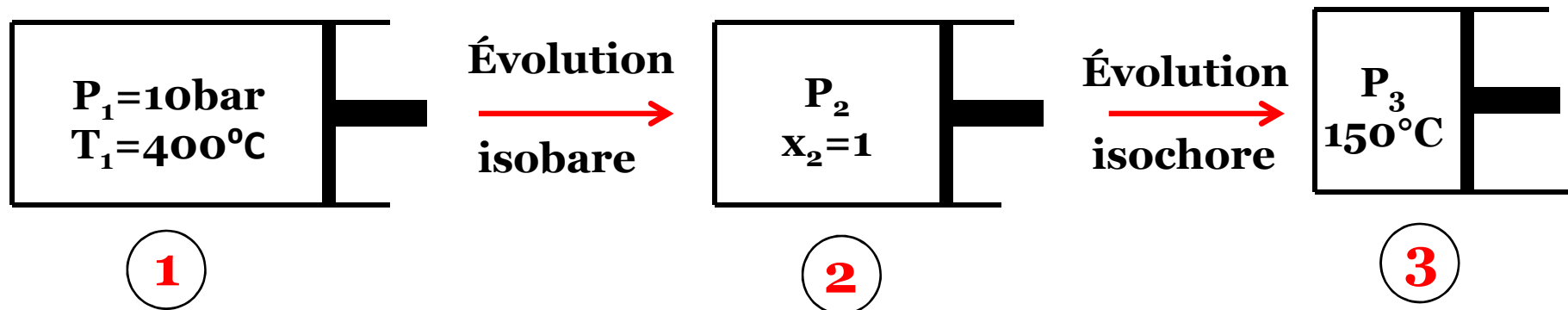
Exemple 6 (Exo. 3-63)

Un réservoir de 1 m^3 qui contient de l'air à 25°C et à 500 kPa est relié, au moyen d'une soupape, à un autre réservoir qui contient 5 kg d'air à 35°C et à 200 kPa . La soupape est ouverte et, après un certain temps, le système atteint l'équilibre thermique avec le milieu extérieur à 20°C .

Déterminez le volume du deuxième réservoir et la pression d'équilibre de l'air.



Exemple 7



- 1) Montrez l'évolution sur diagramme T-v et P-v
- 2) W_{1-3}
- 3) Q_{1-3}

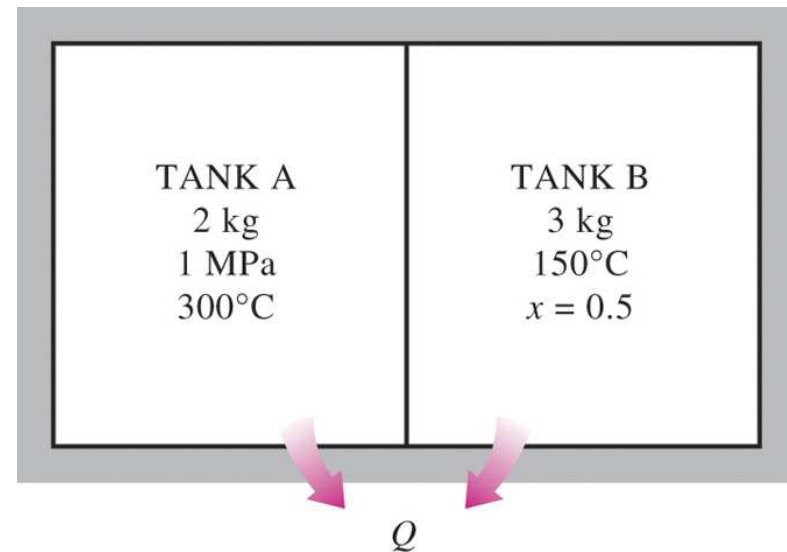
Solution (en classe)

Exemple 8 (Exo. 4.31)

Deux réservoirs, **A** et **B**, sont séparés par une paroi. Le réservoir **A** contient 2 kg de vapeur d'eau à 1 MPa et à 300°C, alors que le réservoir **B** contient 3kg d'un mélange d'eau liquide-vapeur saturé à 150°C et à $x=0,5$. Soudainement, la paroi est retirée. Au moment d'atteindre l'équilibre mécanique et thermique, les deux réservoirs se trouvent à 300 kPa.

- 1) La température et le titre de la vapeur d'eau
- 2) La chaleur perdue par chacun des réservoirs

Solution (en classe)



Lecture suggérée

Sections **3.1 à 3.6, 4.3, 4.5** du livre, «**Thermodynamique, une approche pragmatique**», Y. Cengel, M. Boles, M. Kanoğlu et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2019.