

# **PROPRIÉTÉS DES SUBSTANCES PURES**

**(Chapitre 3)**

**(Quiz no. 4)**

*(Thermodynamique, une approche pragmatique, Y. Çengel,  
M.A. Boles, M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2008)*  
**(lecture obligatoire pour Quiz no. 4: pages 95 à 117)**

**Marcel Lacroix**

**Université de Sherbrooke**

# Mots clés

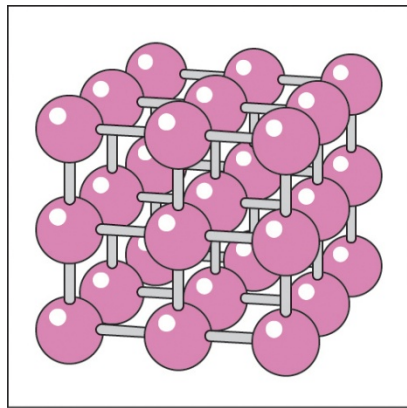
- **Substance pure**
- **Phases: solide, liquide et gaz**
- **Liquide comprimé, liquide saturé, mélange saturé, vapeur saturée, vapeur surchauffée (eau, réfrigérant R-134a)**
- **Diagrammes de phase**
- **Tables de variables thermodynamiques**
- **Gaz parfaits**

# OBJECTIFS

- **Définir les propriétés de substances pures.**
- **Comprendre et utiliser les tables de vapeur d'eau.**

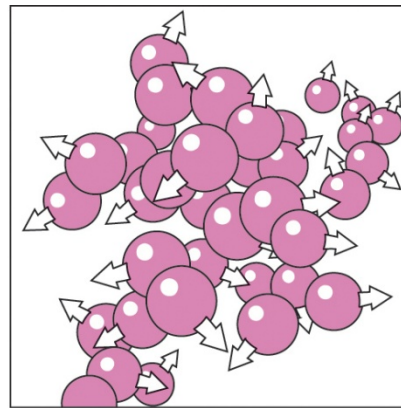
# SUBSTANCE PURE: DÉFINITION

- **Composition chimique stable et homogène.**
- **Peut exister sous différentes phases mais sa composition chimique est la même dans chaque phase (solide, liquide, gaz).**



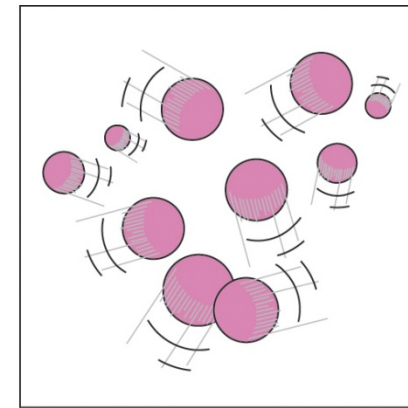
(a)

**SOLIDE**



(b)

**LIQUIDE**



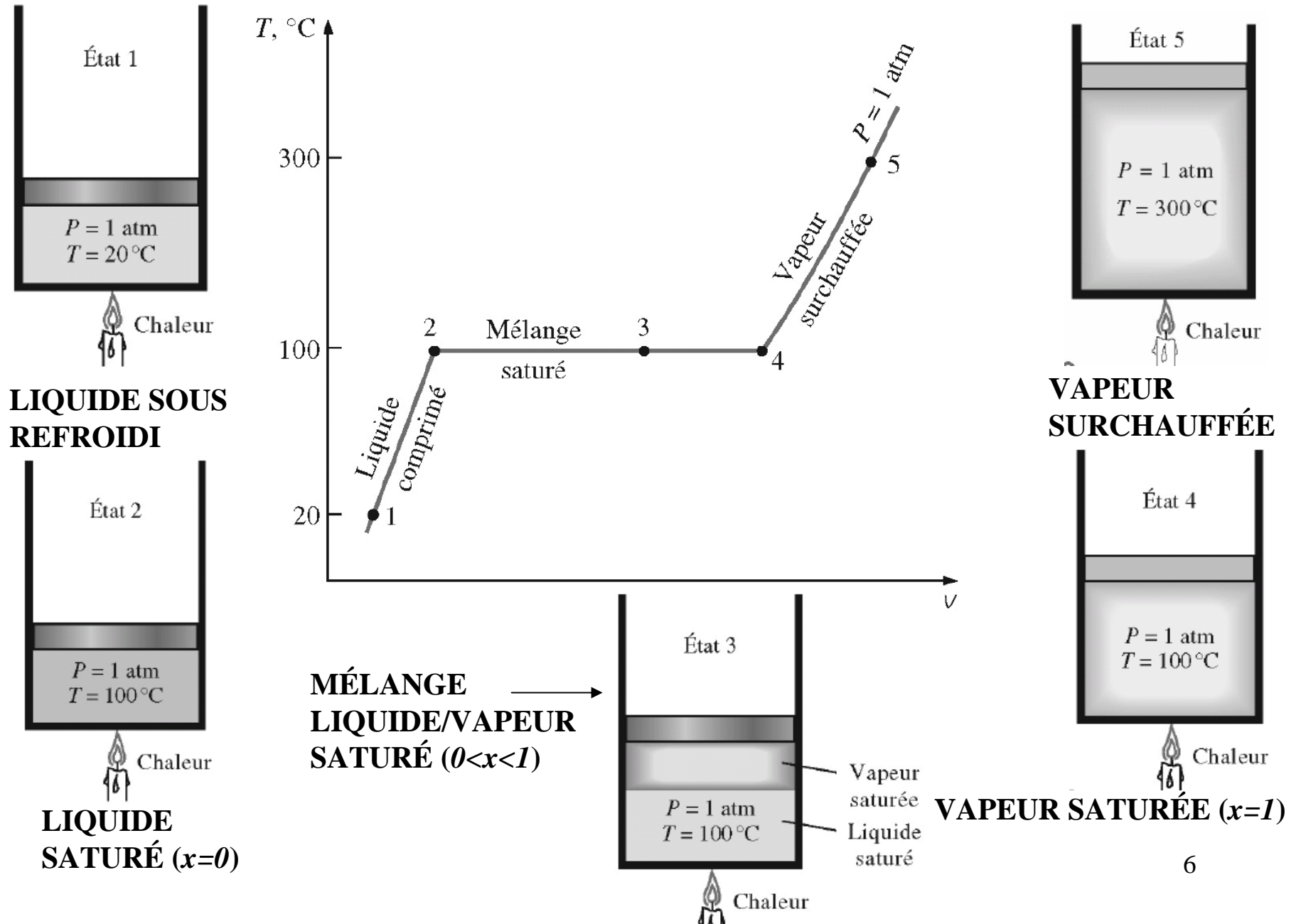
(c)

**GAZ**

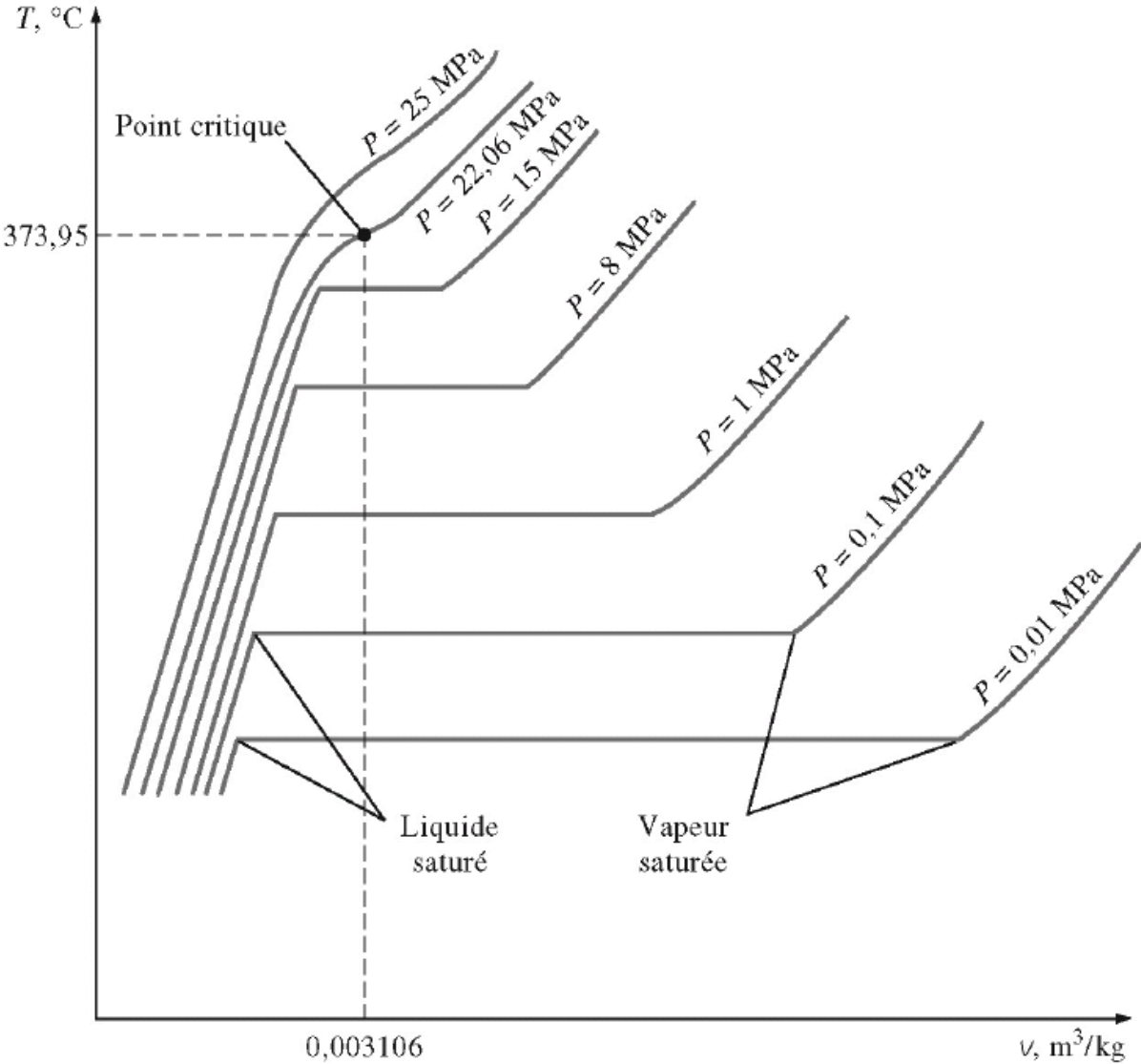
# VARIABLES THERMODYNAMIQUES

- **L'état d'un système thermodynamique est décrit par ses variables thermodynamiques.**
- **Pour les substances compressibles comme *l'eau, les réfrigérants et l'air*, deux variables indépendantes sont suffisantes pour décrire l'état du système.**
- **Les variables sont déterminées à l'aide de:**
  - tables (substances compressibles)**
  - équation d'état (gaz)**
  - tableau (solide).**

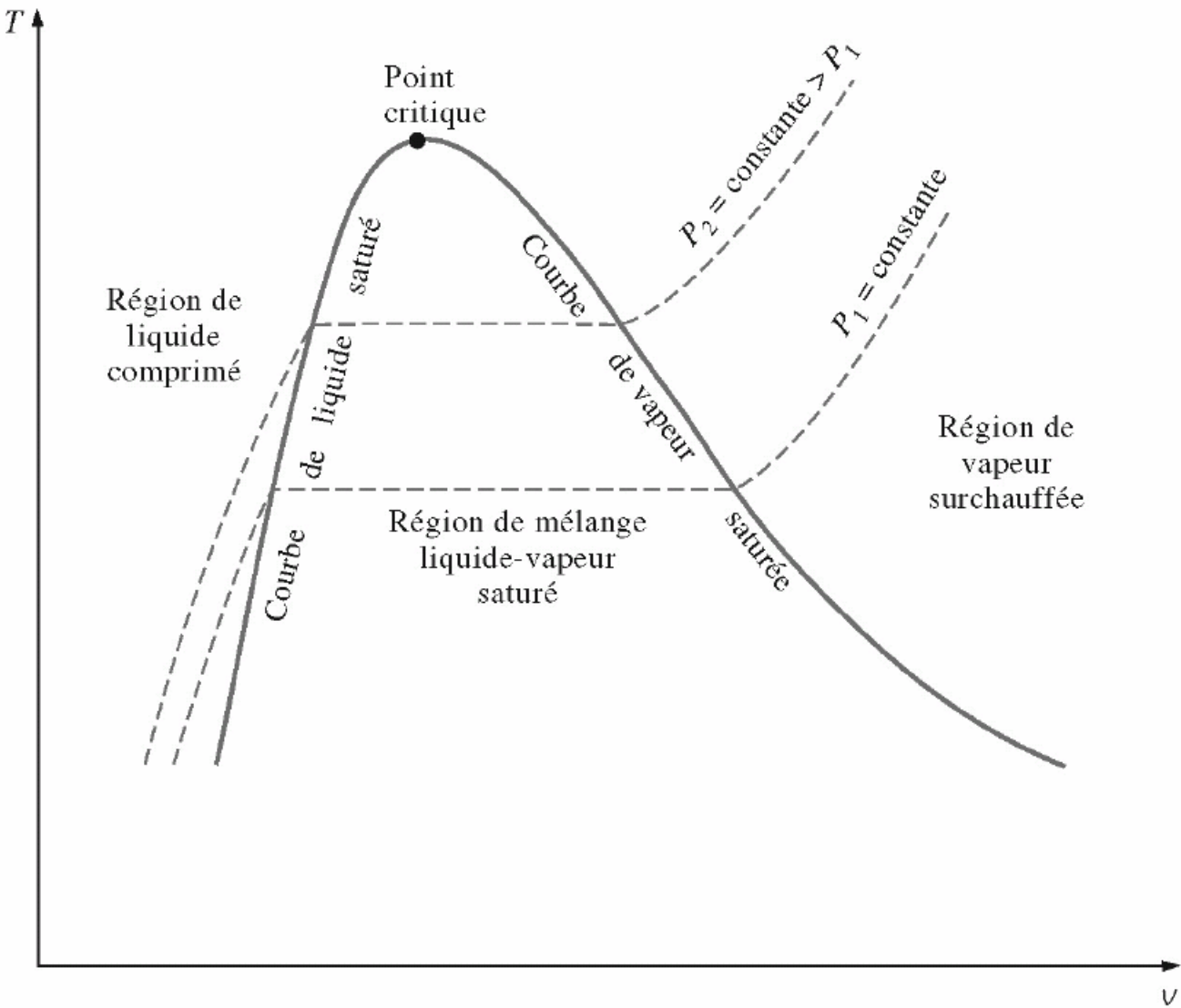
# CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE-GAZ



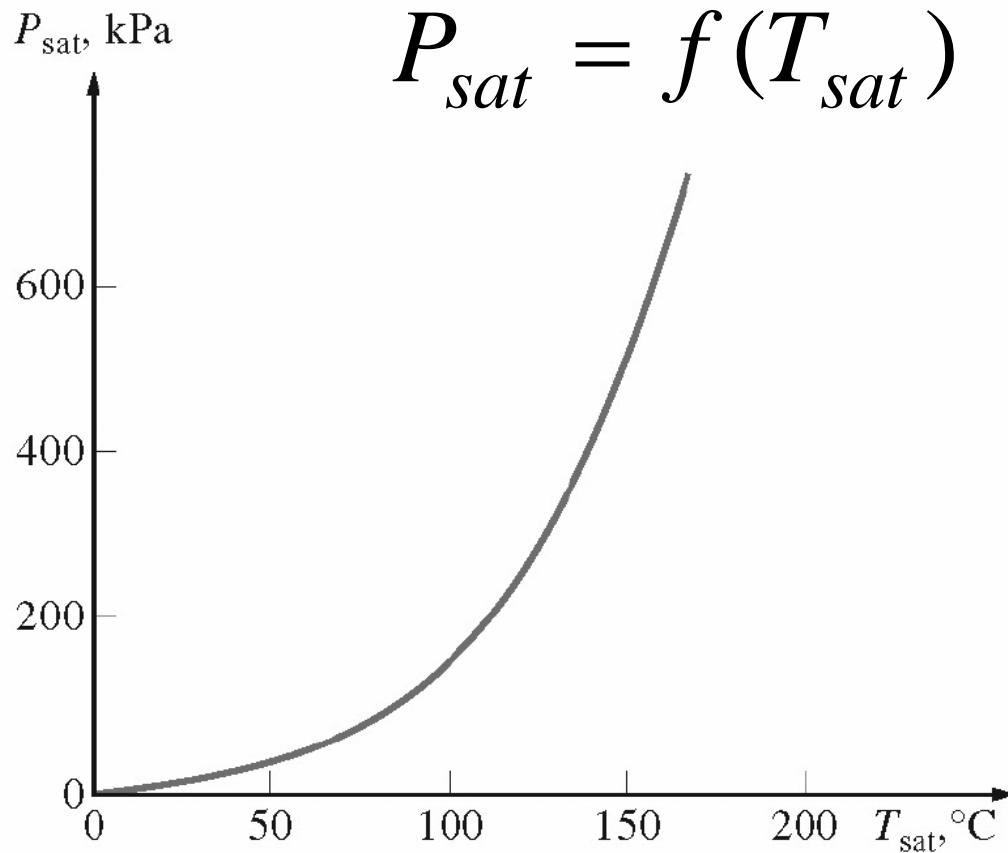
# Diagramme $T-v$



# Diagramme $T-v$



# Courbe de saturation d'une substance pure



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

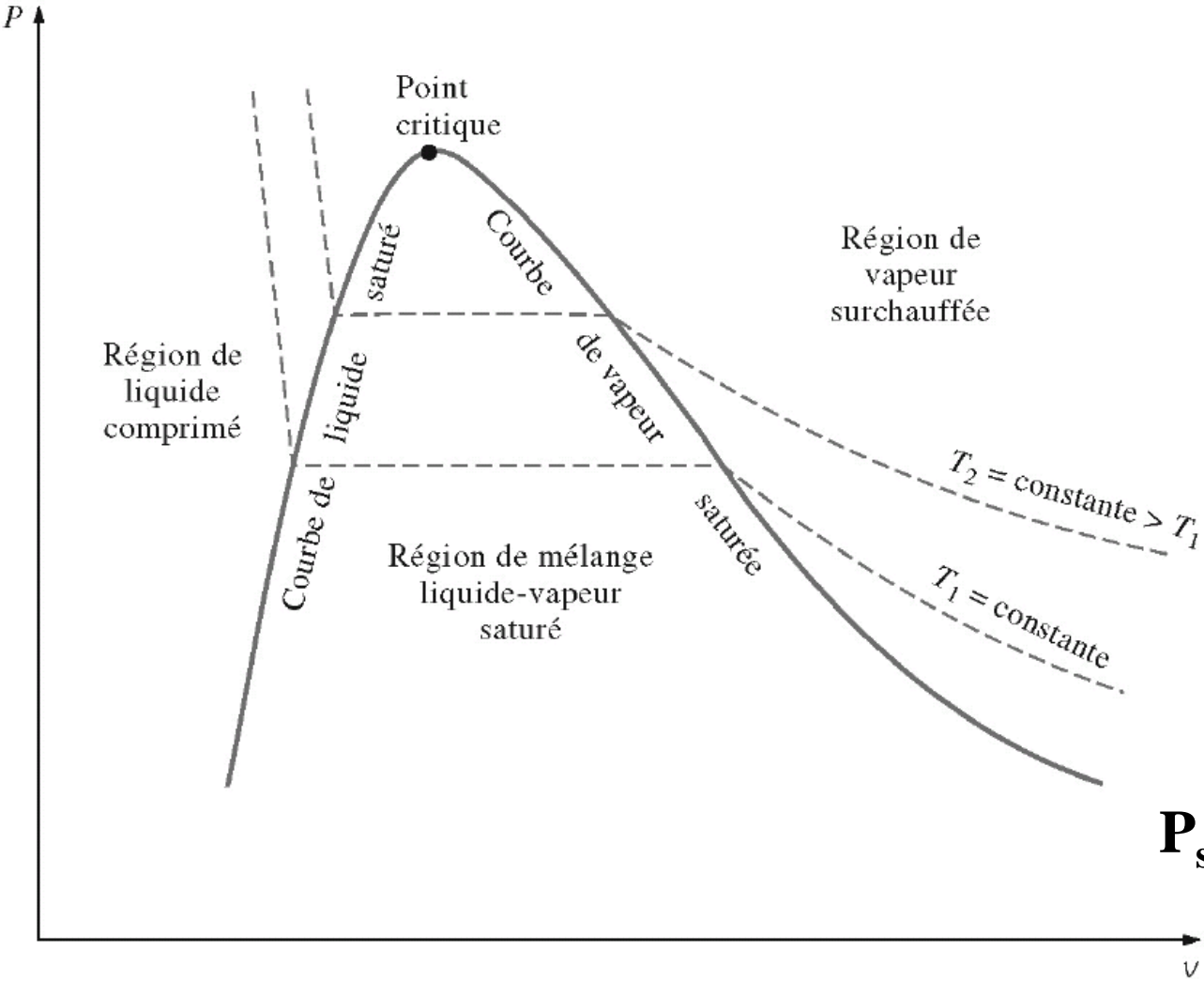
# Effet de la pression atmosphérique sur les systèmes

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

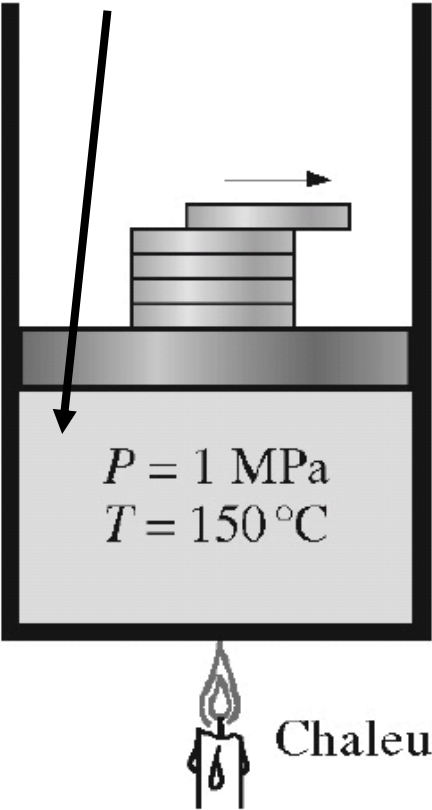
---

Élévation (en mètres)	Pression atmosphé- rique (en kilopascals)	Tempéra- ture d'ébul- lition (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

# Diagramme P- $v$

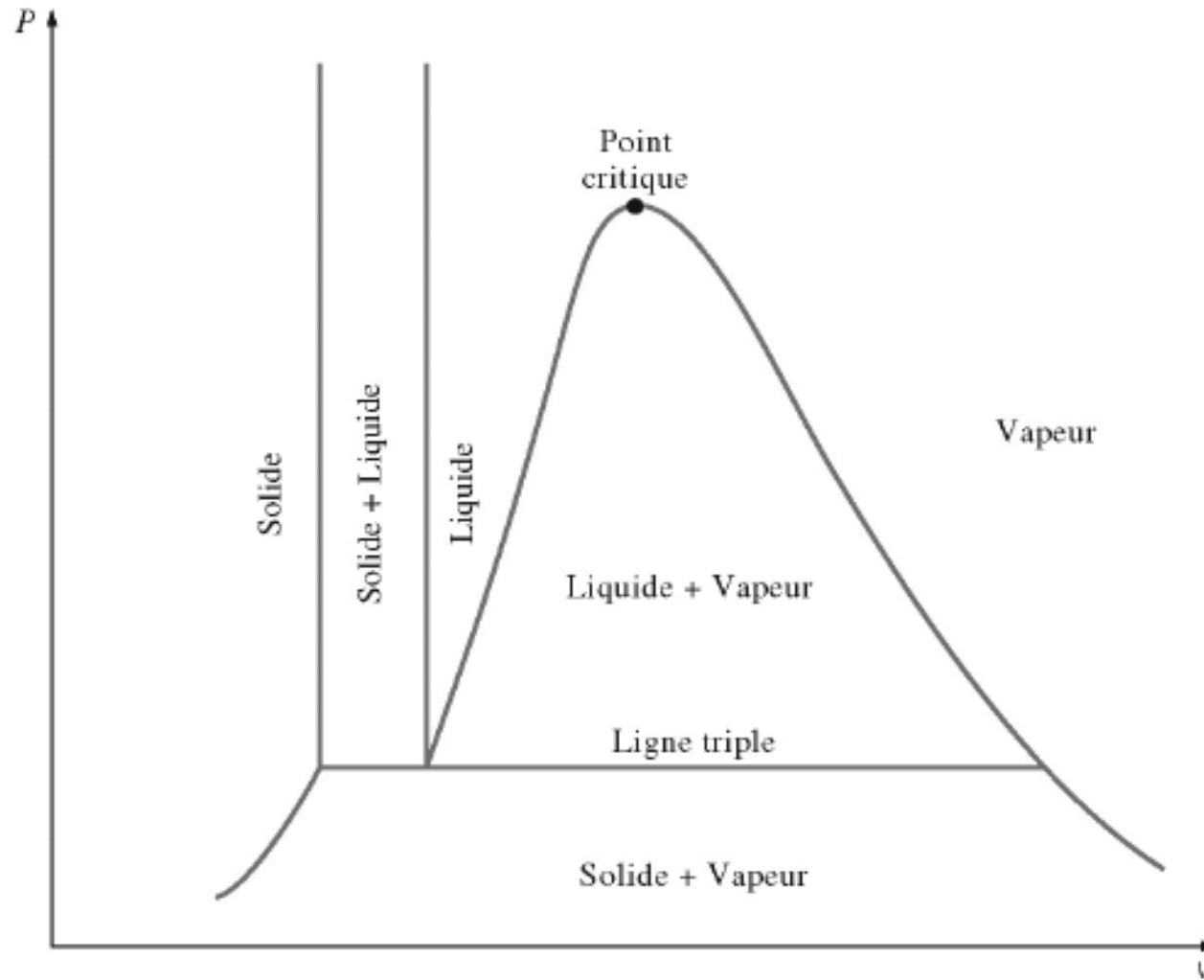


Eau: liquide comprimé.

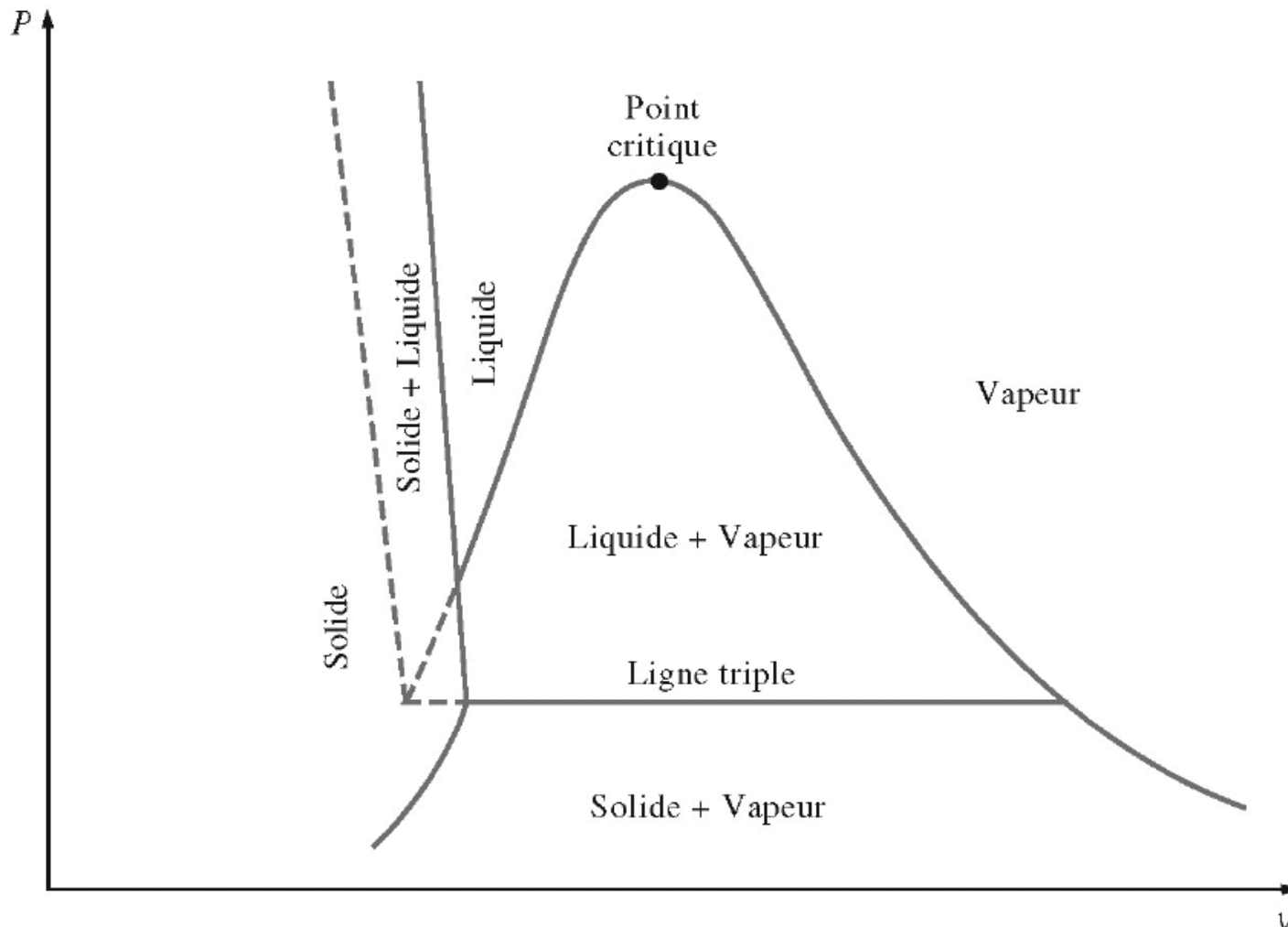


$P_{\text{sat}} = 476 \text{ kPa}$  à  $150^\circ\text{C}$

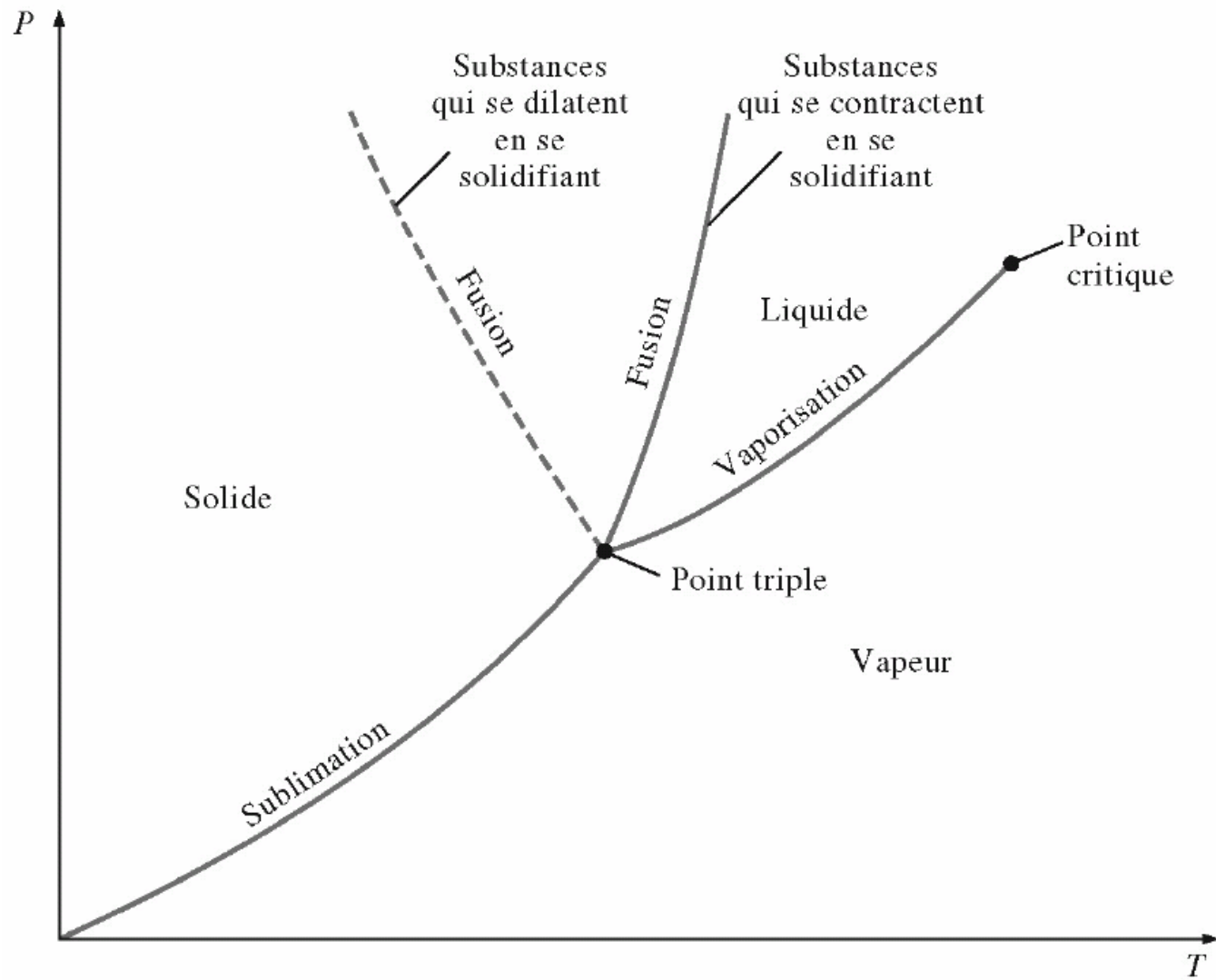
# Diagramme P- $v$ (avec phase solide): contraction lors de la solidification



# Diagramme P- $v$ (avec phase solide): dilatation lors de la solidification (eau)



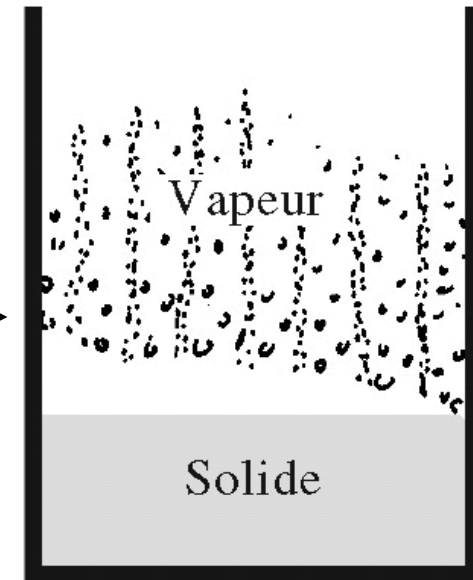
# Diagramme P-T



**TABLEAU 3.3**

Température et pression de diverses substances au point triple

Substance	Formule	$T_{pt}$ , K	$P_{pt}$ , kPa
Acétylène	$C_2H_2$	192,4	120
Ammoniac	$NH_3$	195,40	6,076
Argon	A	83,81	68,9
Azote	$N_2$	63,18	12,6
Carbone (graphite)	C	3 900	10 100
Chlorure d'hydrogène	HCl	158,96	13,9
Deutérium	$D_2$	18,63	17,1
Dioxyde de carbone	$CO_2$	216,55	517
Dioxyde de soufre	$SO_2$	197,69	1,67
Eau	$H_2O$	273,16	0,61
Éthane	$C_2H_6$	89,89	$8 \times 10^{-4}$
Éthylène	$C_2H_4$	104,0	0,12
Hélium 4 ( $\lambda$ point)	He	2,19	5,1
Hexafluorure d'uranium	$UF_6$	337,17	151,7
Hydrogène	$H_2$	13,84	7,04
Mercure	Hg	234,2	$1,65 \times 10^{-7}$
Méthane	$CH_4$	90,68	11,7
Monoxyde de carbone	CO	68,10	15,37
Néon	Ne	24,57	43,2
Oxyde nitreux	$N_2O$	182,34	87,85
Oxyde nitrique	NO	109,50	21,92
Oxygène	$O_2$	54,36	0,152
Palladium	Pd	1 825	$3,5 \times 10^{-3}$
Platine	Pt	2 045	$2,0 \times 10^{-4}$
Titane	Ti	1 941	$5,3 \times 10^{-3}$
Xénon	Xe	161,3	81,5
Zinc	Zn	692,65	0,065



# VARIABLES THERMODYNAMIQUES D'UNE SUBSTANCE PURE

1. **Volume massique:**  $v$  (m<sup>3</sup>/kg)
2. **Énergie interne:**  $u$  (kJ/kg)
3. **Enthalpie:**  $h = u + p v$  (kJ/kg)
4. **Entropie:**  $s$  (kJ/kg K)

# ÉNERGIE INTERNE $u$ (kJ/kg)

Énergie interne = somme de toutes les formes d'énergie à l'échelle microscopique:

1. *Énergie sensible*: vibration, rotation et translation moléculaire.
2. *Énergie latente*: changement de phase de la substance.
3. *Énergie chimique*: liaisons entre les atomes différents.
4. *Énergie nucléaire* : liaisons entre les nucléons.

# ENTHALPIE $h$ (kJ/kg)

- **L'enthalpie est définie comme:**

$$h = u + pv$$

(kJ/kg) (kPa) (m<sup>3</sup>/kg)

- **Variable rencontrée fréquemment dans les systèmes mettant en jeu des écoulements.**

# ENTROPIE $S$ (kJ/kgK)

- **Entropie: mesure du désordre d'un système à l'échelle microscopique.**
- **Variable qui découle naturellement de la 2<sup>ème</sup> loi de la thermodynamique.**
- **Variable fort utile dans le calcul des évolutions de diverses machines thermiques (moteurs, turbines, pompes, compresseurs, etc.).**

**EXEMPLE:**  
**TABLES THERMODYNAMIQUES**  
**DE L'EAU**

# État d'une substance pure à saturation (Eau: Tables A4 et A5)

- La pression et la température ne sont pas indépendantes.
- Deux variables indépendantes telles la pression et le volume massique ou la pression et le titre sont requises pour déterminer l'état de saturation d'une substance pure.

**TITRE:** 
$$x = \frac{(masse\_de\_vapeur)}{(masse\_de\_vapeur + masse\_de\_liquide)}$$

$$0 \leq x \leq 1$$

# Table A-4

Temp. °C $T$	Pression de saturation $P_{sat}$	Volume massique m <sup>3</sup> /kg	
		Liquide saturé $v_f$	Vapeur saturée $v_g$
85	57,868	0,001032	2,8261
90	70,183	0,001036	2,3593
95	84,609	0,001040	1,9808

↑  
Température

↑  
Pression de saturation correspondante

↑  
Volume massique du liquide saturé

↑  
Volume massique de la vapeur saturée

## Variables de l'eau à saturation: température connue

$$\phi = x \cdot \phi_g + (1 - x) \cdot \phi_f$$

# 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 $\text{m}^3/\text{kg}$		Énergie interne $\text{kJ/kg}$			Enthalpie $\text{kJ/kg}$			Entropie $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$		
		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

# 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 $T_{\text{sat}}$ , °C	Volume massique $\text{m}^3/\text{kg}$		Énergie interne $\text{kJ}/\text{kg}$			Enthalpie $\text{kJ}/\text{kg}$			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

# Vapeur surchauffée A-6

TABLE A.6

Variables de la vapeur d'eau surchauffée.

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg·K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg·K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg·K
	$P = 0,01 \text{ MPa (45,81 °C)}^*$				$P = 0,05 \text{ MPa (81,32 °C)}$				$P = 0,10 \text{ MPa (99,61 °C)}$			
Sat. <sup>†</sup>	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

# Liquide comprimé A-7

**TABLE A.7**

Variables de l'eau comprimée.

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /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

# Liquide comprimé

- **Table A-7**
- **Sinon**

$$v \approx v_{f,T};$$

$$u \approx u_{f,T};$$

$$s \approx s_{f,T};$$

$$h \approx h_{f,T} + v_{f,T} (P - P_{sat,T});$$

# **TABLES THERMODYNAMIQUES**

- **Tables thermodynamiques disponibles pour d'autres fluides (ex: fluide frigorigène R134a).**
- **Recommandation: si des tables existent pour un fluide, UTILISEZ LES!**

# INTERPOLATION LINÉAIRE

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

Température(°C)	Volume massique(m <sup>3</sup> /kg)
200	0,20602
250	0,23275

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

# ÉQUATION D'ÉTAT GAZ PARFAIT

- Alternative aux tables pour relier la pression, la température et le volume massique.
- Équation d'état la plus simple.

$$\begin{array}{l}
 \text{(kPa)} \rightarrow P \bar{v} = R T \leftarrow \text{(K)} \quad \text{AIR} \\
 \begin{array}{cc}
 \nearrow & \nwarrow \\
 \text{(m}^3\text{/kg)} & \text{(kJ/kgK)}
 \end{array} \\
 R = \frac{\bar{R}}{M} \quad \begin{array}{l} M=28,97 \text{ kg/kmole;} \\ R=0,287 \text{ kJ/kgK} \end{array} \\
 \begin{array}{c} \nwarrow \\ \text{Masse molaire} \\ \text{(kg/kmole)} \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{(kPa)} \rightarrow P \bar{v} = \bar{R} T \leftarrow \text{(K)} \\
 \begin{array}{cc}
 \nearrow & \nwarrow \\
 \text{(m}^3\text{/kmole)} & \text{(8,314 kJ/kmoleK)}
 \end{array}
 \end{array}$$

TABLE A.1

Masse molaire, constante des gaz et point critique.

Substance	Formule	Masse molaire $M$ , kg/kmol	Constante du gaz $R$ , kJ/kg · K*	Point critique		
				Température, K	Pression, MPa	Volume, m <sup>3</sup> /kmol
Air	—	28,97	0,2870	132,5	3,77	0,0883
Ammoniac	NH <sub>3</sub>	17,03	0,4882	405,5	11,28	0,0724
Argon	Ar	39,948	0,2081	151	4,86	0,0749
Azote	N <sub>2</sub>	28,013	0,2968	126,2	3,39	0,0899
Benzène	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,115	0,1064	562	4,92	0,2603
Bromine	Br <sub>2</sub>	159,808	0,0520	584	10,34	0,1355
<i>n</i> -Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,124	0,1430	425,2	3,80	0,2547
Chlore	Cl <sub>2</sub>	70,906	0,1173	417	7,71	0,1242
Chloroforme	CHCl <sub>3</sub>	119,38	0,06964	536,6	5,47	0,2403
Chlorure de méthyl	CH <sub>3</sub> Cl	50,488	0,1647	416,3	6,68	0,1430
Dichlorodifluorométhane (R-12)	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120,91	0,06876	384,7	4,01	0,2179
Dichlorofluorométhane (R-21)	CHCl <sub>2</sub> F	102,92	0,08078	451,7	5,17	0,1973
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	44,01	0,1889	304,2	7,39	0,0943
Dioxyde de soufre	SO <sub>2</sub>	64,063	0,1298	430,7	7,88	0,1217
Eau	H <sub>2</sub> O	18,015	0,4615	647,1	22,06	0,0560
Éthane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,070	0,2765	305,5	4,48	0,1480
Éthanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,07	0,1805	516	6,38	0,1673
Éthylène	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,054	0,2964	282,4	5,12	0,1242
Hélium	He	4,003	2,0769	5,3	0,23	0,0578
<i>n</i> -Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86,179	0,09647	507,9	3,03	0,3677
Hydrogène (normal)	H <sub>2</sub>	2,016	4,1240	33,3	1,30	0,0649
Krypton	Kr	83,80	0,09921	209,4	5,50	0,0924
Méthane	CH <sub>4</sub>	16,043	0,5182	191,1	4,64	0,0993
Méthanol	CH <sub>3</sub> OH	32,042	0,2595	513,2	7,95	0,1180
Monoxyde de carbone	CO	28,011	0,2968	133	3,50	0,0930
Néon	Ne	20,183	0,4119	44,5	2,73	0,0417
Oxyde nitreux	N <sub>2</sub> O	44,013	0,1889	309,7	7,27	0,0961
Oxygène	O <sub>2</sub>	31,999	0,2598	154,8	5,08	0,0780
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,097	0,1885	370	4,26	0,1998
Propylène	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,081	0,1976	365	4,62	0,1810
Tétrachlorure de carbone	CCl <sub>4</sub>	153,82	0,05405	556,4	4,56	0,2759
Tétrafluoroéthane (R-134a)	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	102,03	0,08149	374,2	4,059	0,1993
Trichlorofluorométhane (R-11)	CCl <sub>3</sub> F	137,37	0,06052	471,2	4,38	0,2478
Xénon	Xe	131,30	0,06332	289,8	5,88	0,1186

\* L'unité kJ/kg · K est équivalente à l'unité kPa · m<sup>3</sup>/kg · K. La constante du gaz est calculée avec l'expression  $R = R_u/M$  où  $R_u = 8,31447$  kJ/kmol · K et  $M$  est la masse molaire.

# POINTS CRITIQUES

<b>SUBSTANCE</b>	<b>TEMPÉRATURE (K)</b>	<b>PRESSION (kPa)</b>
<b>Air</b>	<b>133</b>	<b>3 770</b>
<b>Dioxyde de carbone</b>	<b>304</b>	<b>7 390</b>
<b>R-134a</b>	<b>374</b>	<b>4 059</b>
<b>Eau</b>	<b>647</b>	<b>22 060</b>

# FACTEUR DE COMPRESSIBILITÉ

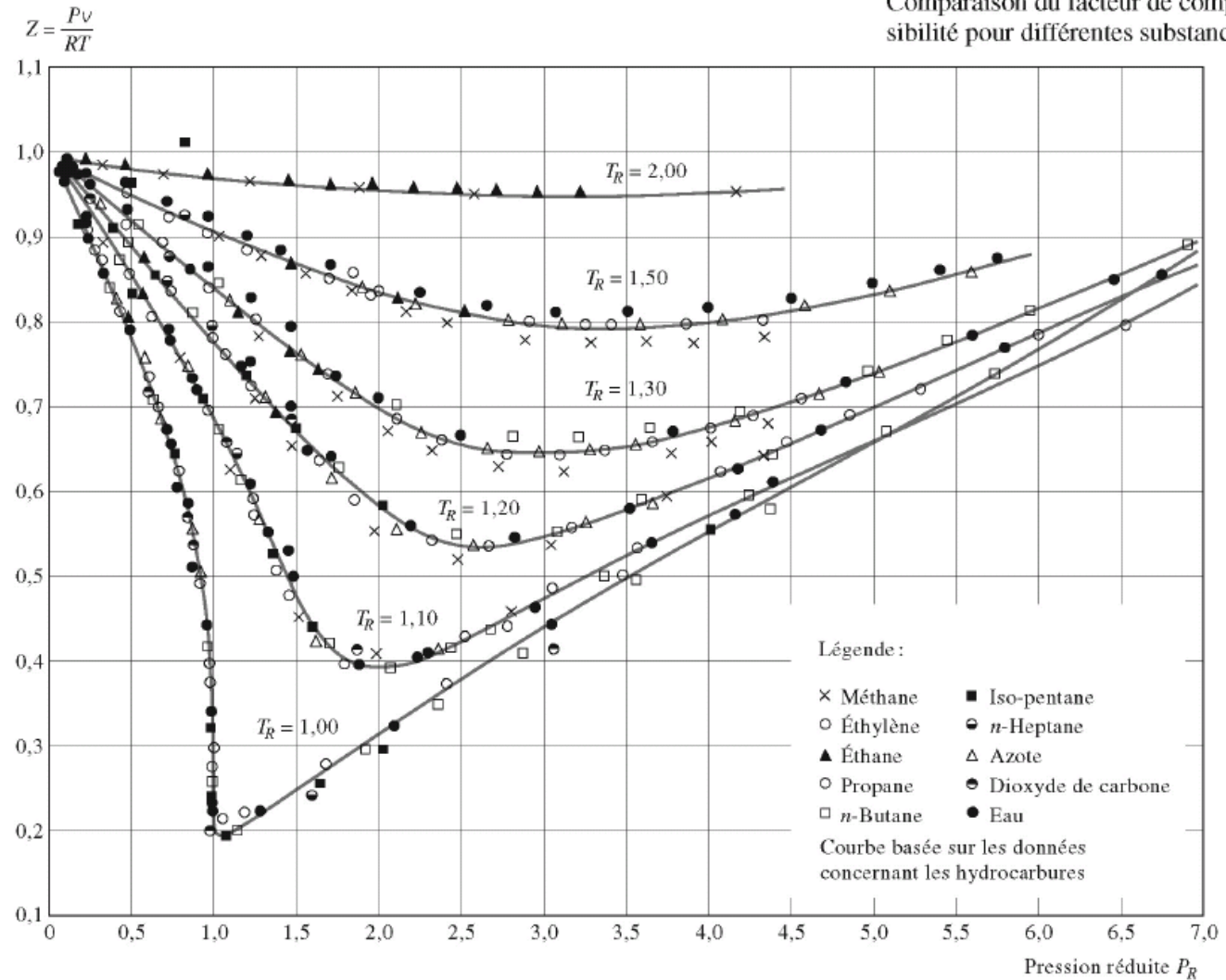
FIGURE 3.49

Comparaison du facteur de compressibilité pour différentes substances.

$$Z = \frac{Pv}{RT}$$

$$P_r = \frac{P}{P_{cr}}$$

$$T_r = \frac{T}{T_{cr}}$$



# **FACTEUR DE COMPRESSIBILITÉ: CONCLUSIONS**

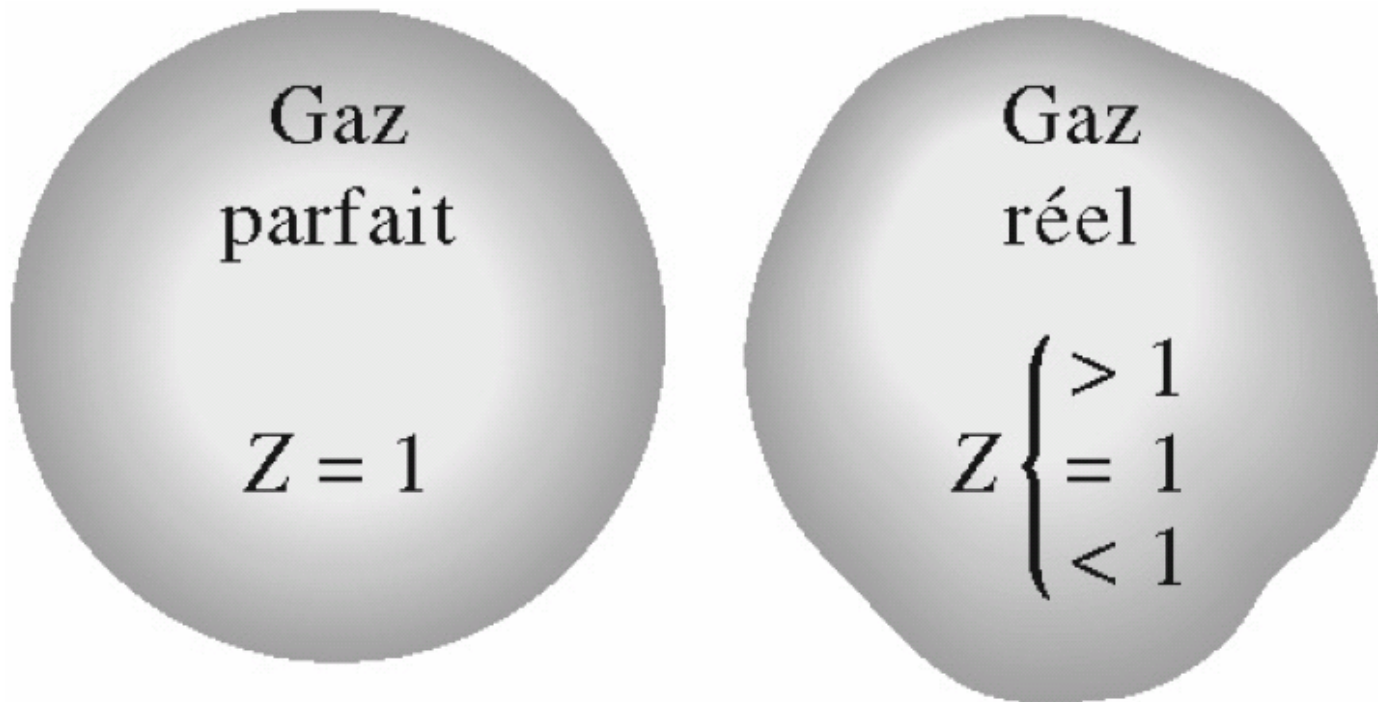
- **À basses pressions,  $P_r \ll 1$  , les gaz se comportent comme des gaz parfaits peu importe la température.**
- **À hautes températures,  $T_r > 2$  , les gaz se comportent comme des gaz parfaits peu importe la pression.**
- **L'écart avec la loi des gaz parfait est maximal au voisinage de la pression critique.**

# FACTEUR DE COMPRESSIBILITÉ: CORRECTION À LA LOI DES GAZ PARFAITS

$$\begin{array}{c} \text{(kPa)} \rightarrow P \nu = ZRT \leftarrow \text{(K)} \\ \quad \quad \quad \nearrow \quad \quad \quad \uparrow \\ \quad \quad \quad \text{(m}^3\text{/kg)} \quad \text{(kJ/kgK)} \end{array}$$

où  $Z = \frac{\nu_{\text{corrigé}}}{\nu_{\text{parfait}}}$

# Gaz parfait vs gaz réel



# PEUT-ON CONSIDÉRER LA VAPEUR D'EAU COMME UN GAZ PARFAIT?

- À des pressions inférieures à 10kPa, la vapeur d'eau peut être considérée comme un gaz parfait.
- *Air climatisé*: La vapeur d'eau peut être considérée comme un gaz parfait. Dans ces applications, la pression de la vapeur d'eau demeure inférieure à 10 kPa.
- *Cycles de vapeur*: Les pressions en jeu sont beaucoup plus élevées que 10 kPa. Dans ce cas, les Tables thermodynamiques sont utilisées.



# EXERCICES SUGGÉRÉS

**Chapitre 3, *THERMODYNAMIQUE, une approche pragmatique*, Y.A. Çengel, M.A. Boles et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2008.**

**Les exercices dont le numéro est suivi de la lettre 'C' et les exercices numéro 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.32, 3.44, 3.45, 3.55, 3.76, 3.77**