

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
MEC1210 THERMODYNAMIQUE

Note : - L'examen est sur 100 points.

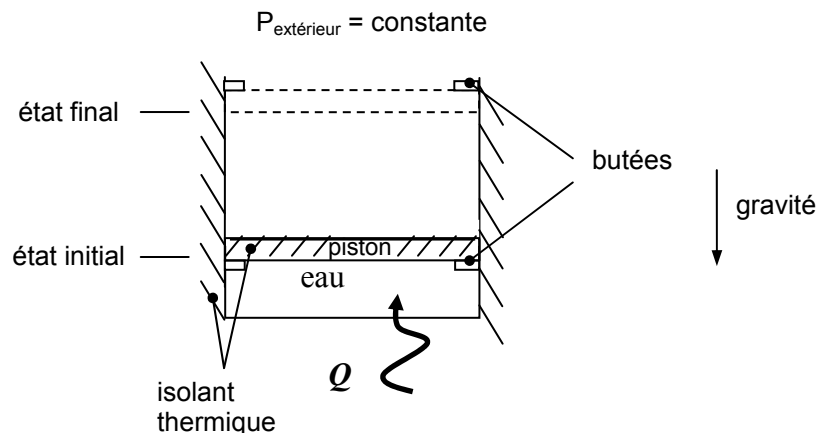
- Il faut définir le système pour appliquer la 1<sup>ère</sup> loi de la thermodynamique.

- Les tables thermodynamiques se trouvent sur les pages 7 à 9.

Question No. 1 (25 points)

Un cylindre vertical fixe, rigide et isolé thermiquement, mais dont le fond est perméable à la chaleur contient un piston fait d'isolant thermique. Le piston repose initialement sur des butées et contient de l'eau à une pression de  $100 \text{ kPa}$  et une température de  $80^\circ\text{C}$  dans un volume de  $4.116 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ . On chauffe l'eau jusqu'à ce que le piston monte s'appuyer *solidement* sur les butées du haut. Le volume de l'eau est alors de  $0.23808 \text{ m}^3$  à une pression de  $400 \text{ kPa}$ . On note par ailleurs qu'il faut une pression de  $300 \text{ kPa}$  pour soulever le piston. Le processus est quasi-statique et on peut supposer que la pression à l'extérieur du cylindre est constante. On peut négliger toute friction ainsi que les changements d'énergies cinétique et potentielle de l'eau et d'énergie thermique des composantes solides.

Figure 1



On demande de:

- Déterminer la température (en  $^\circ\text{C}$ ) et la phase finale de l'eau. (6 points)
- Calculer le travail fait par l'eau. (5 points)
- Déterminer la quantité de chaleur ( $Q$ ) transférée à l'eau (en kJ). (7 points)
- Tracer les diagrammes P-v et T-v pour l'eau avec le dôme de saturation en y montrant les états et évolutions. (7 points)

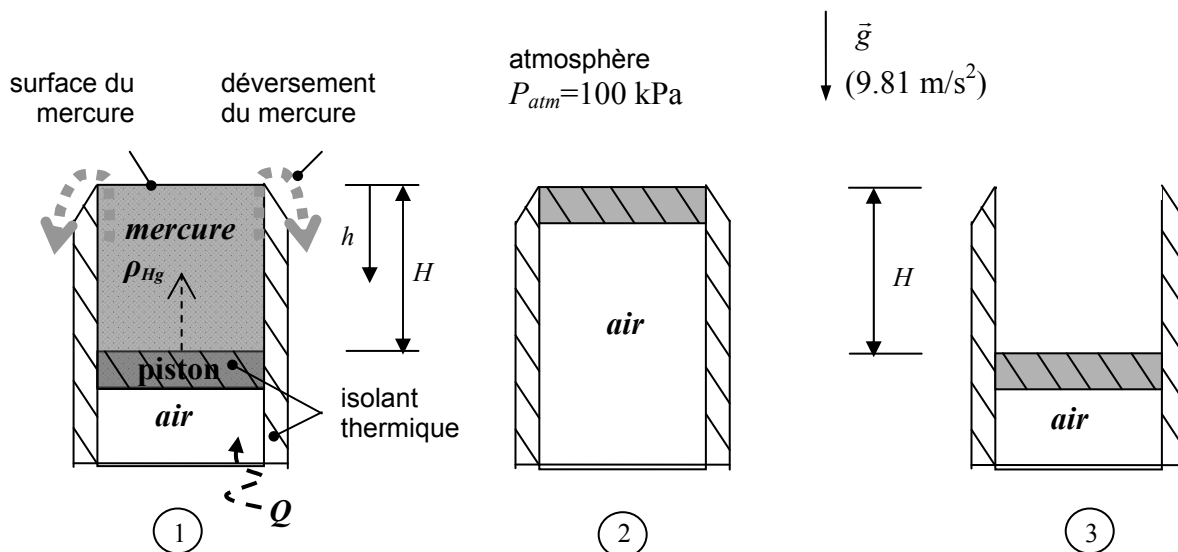
**Question No. 2 (25 points)**

Un cylindre vertical stationnaire avec l'extrémité supérieure ouvert à l'atmosphère contient un piston ayant une masse de  $5000 \text{ kg}$  et une aire de  $0.4905 \text{ m}^2$  tel que montré dans la figure 2. Le piston et les parois latérales du cylindre sont faits d'isolant thermique parfait alors que le bas du cylindre est perméable à la chaleur. À l'état initial (état1), la cavité étanche sous le piston renferme  $0.9 \text{ kg}$  d'air à  $27^\circ\text{C}$  alors que l'espace au-dessus du piston est rempli jusqu'au haut du cylindre de mercure liquide, qui a une masse volumique constante ( $\rho_{\text{Hg}}$ ) de  $13600 \text{ kg/m}^3$ .

L'air est alors chauffé par le bas du cylindre pour faire monter le piston et déverser graduellement le mercure par les côtés du cylindre, gardant ainsi la surface du mercure au haut du cylindre durant le processus. À l'état 2, le piston a monté de  $0.74954 \text{ m}$  ( $H$ ) atteignant le haut du cylindre, position à laquelle tout le mercure vient d'être déversé. On laisse ensuite l'air se refroidir afin que le piston redescende de  $0.74954 \text{ m}$  ( $H$ ) pour revenir à sa hauteur initiale (état 3).

L'air peut être considéré comme un gaz parfait à *chaleurs massiques constantes* avec  $R = 0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$  et  $c_p = 1.010 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ . On peut négliger toute friction ainsi que les changements d'énergies cinétique et potentielle de l'air et d'énergie thermique des composantes solides. On peut supposer des évolutions *quasi-statiques* et que la pression atmosphérique au-dessus du cylindre est constante à  $100 \text{ kPa}$ . La pression ( $P$ ) dans le mercure à une profondeur  $h$  de la surface (haut du cylindre) est donnée par la relation  $P = P_{\text{atm}} + \rho_{\text{Hg}}gh$ .

Figure 2



On demande de:

- Déterminer les volumes, pressions et températures de l'air pour les états 1, 2 et 3. (9 points)
- Montrer les processus 1-2 et 2-3 pour l'air sur un diagramme P-V. (5 points)
- Calculer le travail **et** l'échange de chaleur du processus 1-2 pour l'air, en indiquant la direction pour chacun (*sur air* ou *par air*). (6 points)
- Calculer le travail **et** l'échange de chaleur du processus 2-3 pour l'air, en indiquant la direction pour chacun (*sur air* ou *par air*). (5 points)

**Question No. 3 (25 points)**

Les porte-avions modernes sont munis d'ascenseurs sur le côté de la coque pour monter les avions du hangar au pont (voir photo sur figure 3). Sur un certain porte-avion, on dispose d'une source de vapeur d'eau à haute température mais à basse pression qu'on voudrait récupérer pour faire fonctionner les ascenseurs. On propose d'implanter le dispositif illustré sur la figure 3, qui est composé d'un cylindre horizontal, thermiquement isolé et muni de deux pistons A et B, chacun avec une aire de  $1.5 \text{ m}^2$ , pour former deux cavités étanches. Le piston A, adjacent à l'atmosphère, est fait d'isolant thermique alors que le piston B conduit de la chaleur et est connecté via une corde traversant l'extrémité du cylindre (avec un joint d'étanchéité) et un système de poulies/corde à l'ascenseur. Le système de poulies a un rapport de  $6:1$ , ce qui implique que chaque unité de déplacement horizontal du piston B se traduit en six unités de déplacement vertical de l'ascenseur, et que la force exercée par l'ascenseur sur le piston B équivaut à six fois le poids  $F$  de l'ascenseur.

Initialement, lorsque l'ascenseur pleinement chargé avec une masse totale de  $25000 \text{ kg}$  est au niveau du hangar, la cavité de droite contient  $12.5 \text{ m}^3$  d'air à  $20^\circ\text{C}$  et on introduit dans la cavité de gauche de la vapeur d'eau à  $400^\circ\text{C}$  à pression atmosphérique ( $100 \text{ kPa}$ ). L'air se fait alors réchauffé par l'eau via le transfert de chaleur à travers le piston B et prend de l'expansion poussant le piston B vers la gauche pour soulever l'ascenseur. À l'état final, l'ascenseur a monté d'une hauteur ( $h$ ) de  $12 \text{ m}$  et l'eau est à l'état de *liquide saturé*.

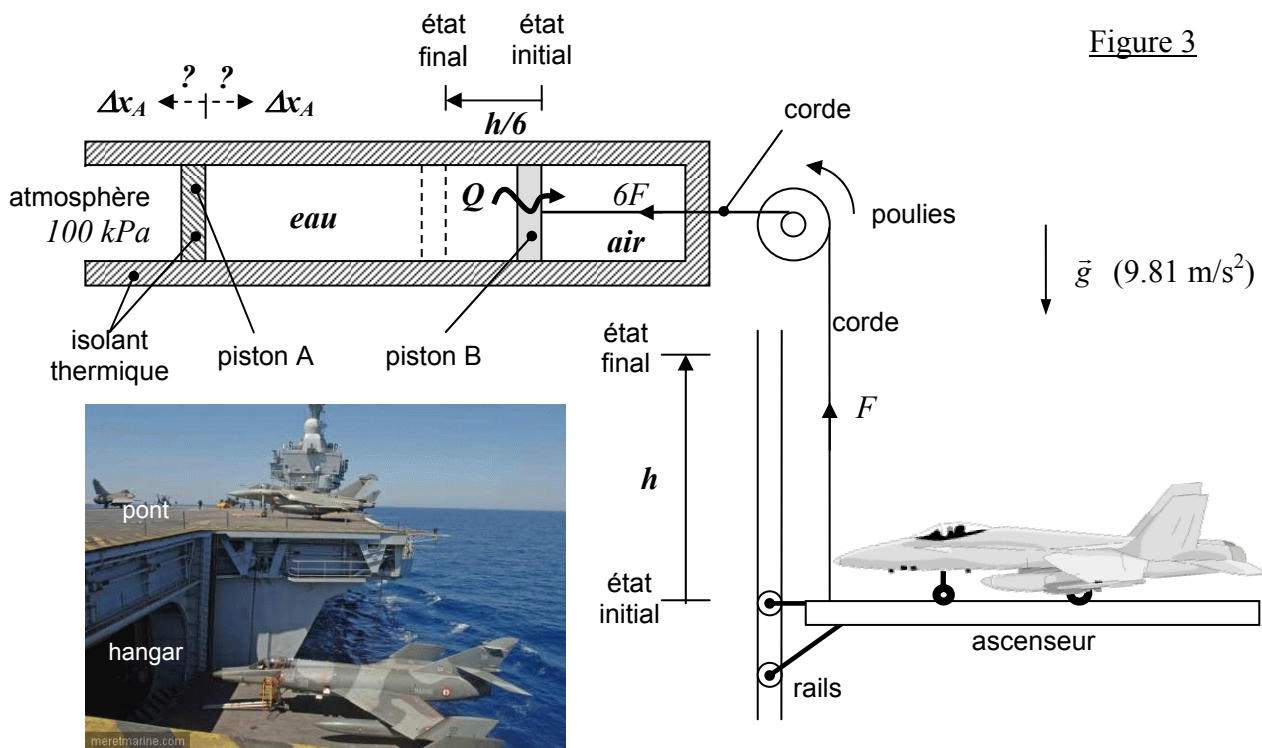


Figure 3

L'air peut être traité comme un gaz parfait à *chaleurs massiques constantes* avec  $R = 0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$  et  $c_p = 1.007 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ . On peut supposer que l'évolution est quasi-statique, que le piston B porte en tout temps le poids entier de l'ascenseur et que la pression atmosphérique est constante à  $100 \text{ kPa}$ . On peut aussi négliger tout changement d'énergie thermique des composantes solides, toute friction, tout transfert de chaleur vers l'extérieur du cylindre ainsi que la masse et l'aire transversale des cordes.

(suite à la page 4)

**Question No. 3 (suite)**

On demande de :

- a) Déterminer la température de l'air à l'état final (état 2). (6 points)
- b) Calculer le transfert de chaleur ( $Q$ ) à l'air. (6 points)
- c) Calculer la masse d'eau (en kg) à mettre dans la cavité de gauche **et** le déplacement (en m) du piston  $A$  ( $\Delta x_A$ ) (valeur et direction – gauche ou droite). (9 points)
- d) Montrer les états et évolutions de l'eau sur des diagrammes T-v **et** P-v (avec dôme de saturation) **et** de l'air sur un diagramme P-v. (3 points)
- e) Calculer le rendement (défini comme ' $travail\ utile/Q$ ') pour ce dispositif. (1 point)

**Question No. 4 (25 points)**

Les plateformes semi-submersibles utilisées pour le forage en mer (souvent pour l'exploitation pétrolière et gazière) doivent pouvoir varier la hauteur de la plateforme au dessus la surface de la mer. On propose un système pouvant accomplir cette tâche en utilisant de la chaleur. Comme illustré sur la figure 4a, ce système consiste à placer dans la partie inférieure submergée de la plateforme un très grand cylindre horizontal, isolé thermiquement de l'eau de mer et ouvert aux deux extrémités contenant deux pistons aussi faits d'isolant thermique. La cavité étanche entre les deux pistons contient de l'air et un ressort linéaire qui lie les pistons (détails sur la figure 4b). Lorsque la plateforme est à son plus bas niveau, la pression de l'eau de mer comprime l'air et le ressort au maximum. Pour fait monter la plateforme, on chauffe l'air et son volume augmente en poussant les deux pistons vers les extrémités du cylindre et relaxant le ressort. La plateforme monte alors d'une hauteur telle que le volume d'eau déplacé par la partie submergée reste le même. Ainsi, dans le cas de la plateforme sur la figure 4a qui est supportée par *trois* colonnes avec chacune une aire transversale ( $A_c$ ) de  $70 \text{ m}^2$ , la montée en hauteur  $h$  obéira à la relation  $3A_c h = \Delta V_{\text{air}}$ , où  $\Delta V_{\text{air}}$  est le *changement* de volume de l'air dans le cylindre due au chauffage.

Figure 4a

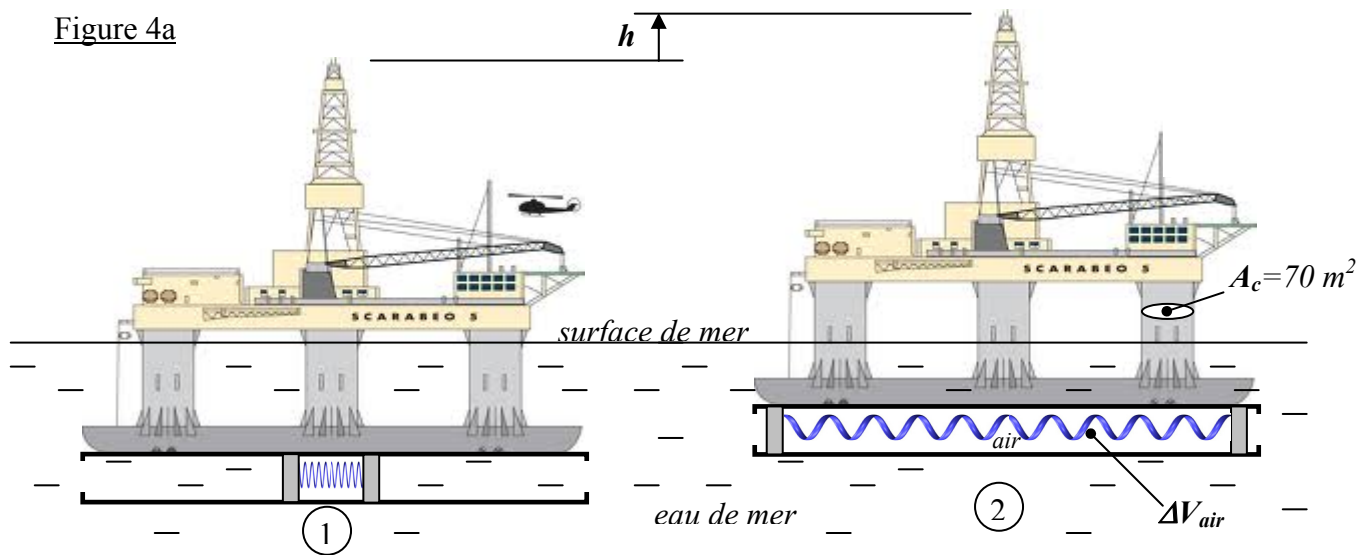
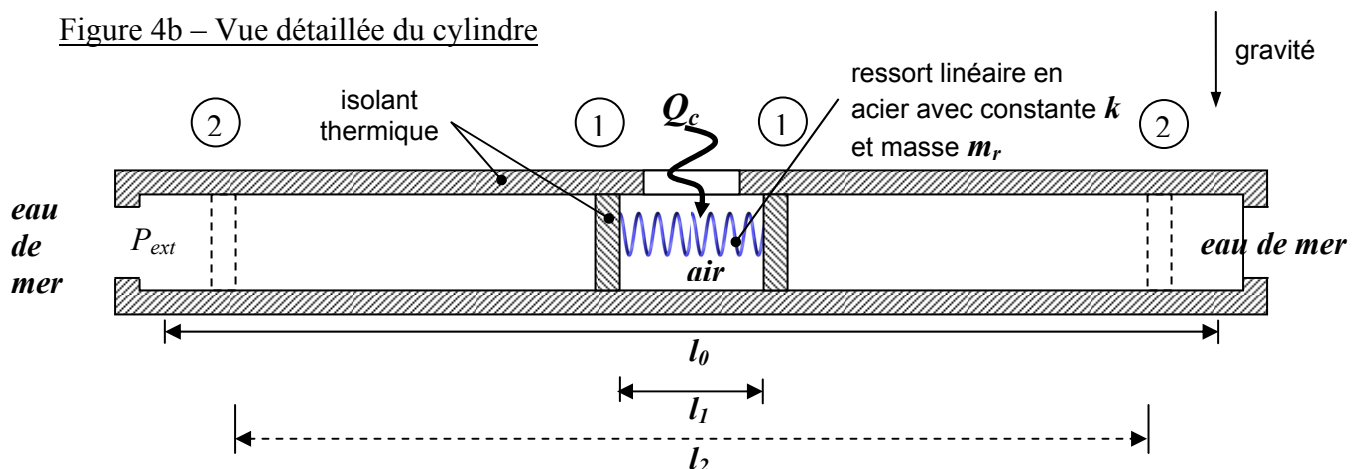


Figure 4b – Vue détaillée du cylindre



(suite à la page 6)

**Question No. 4 (suite)**

Pour la plateforme sur la figure 4, l'aire de chacun des pistons est de  $30 \text{ m}^2$  et le ressort linéaire avec  $k = 78 \text{ kN/m}$  est en acier avec une masse ( $m_r$ ) de  $3000 \text{ kg}$  et sa longueur non comprimée ( $l_0$ ) (c'est-à-dire au repos avec zéro force) est de  $100 \text{ m}$ , ce qui est aussi la longueur maximale de la cavité d'air. À l'état 1, l'air est à  $17^\circ\text{C}$  et la longueur ( $l_1$ ) du ressort et de la cavité d'air est de  $20 \text{ m}$ . La pression extérieure ( $P_{ext}$ ) exercée par l'eau de mer sur les pistons est de  $700 \text{ kPa}$ . On veut ajouter une quantité de chaleur ( $Q_c$ ) à la cavité d'air pour pousser les pistons pour faire monter la plateforme de  $h = 5 \text{ m}$  (état 2).

L'air peut être considéré comme un gaz parfait à *chaleurs massiques variables* avec  $R = 0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$  et l'acier (du ressort) comme une substance incompressible avec une chaleur massique constante de  $0.500 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ . On peut supposer que l'évolution est quasi-statique, que la pression extérieure de l'eau de mer ( $P_{ext}$ ) ne varie pas durant cette évolution, et que la *température du ressort est en tout temps égale à celle de l'air*. On peut négliger tout changement d'énergie thermique *des pistons et parois du cylindre*, toute friction, tout transfert de chaleur vers l'extérieur du cylindre, ainsi que le volume occupé par le ressort dans la cavité d'air.

On demande de :

- Déterminer la pression de l'air à l'état 1 ainsi que sa pression **et** température à l'état 2. (6 points)
- Montrer l'évolution de l'air sur un diagramme P-V. (4 points)
- Calculer le travail fait seulement par l'air sur les pistons. (5 points)
- Calculer le transfert de chaleur total ( $Q_c$ ) requis. (10 points)

**Note :** L'énergie stockée dans un ressort comprimé d'une distance  $\Delta x$  du point de repos (zéro

force) est donnée par  $\frac{1}{2}k(\Delta x)^2$

**Propriétés thermodynamiques**

**Propriétés thermodynamiques de l'eau – table de saturation en fonction de la température**

**TABLE A-4**

Saturated water—Temperature table

Temp., <i>T</i> °C	Sat. press., <i>P</i> <sub>sat</sub> kPa	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, <i>v</i> <sub>f</sub>	Sat. vapor, <i>v</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>u</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>u</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>u</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>h</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>h</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>h</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>s</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>s</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>s</i> <sub>g</sub>
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827

**Propriétés thermodynamiques de l'eau – table de saturation en fonction de la pression**

**TABLE A-5**

Saturated water—Pressure table

Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> <sub>sat</sub> °C	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, <i>v</i> <sub>f</sub>	Sat. vapor, <i>v</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>u</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>u</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>u</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>h</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>h</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>h</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>s</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>s</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>s</i> <sub>g</sub>
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322

Propriétés thermodynamiques de l'eau – tables de vapeur surchauffée

TABLE A-6

Superheated water

$T$ °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
$P = 0.01 \text{ MPa (45.81}^\circ\text{C)}^*$				$P = 0.05 \text{ MPa (81.32}^\circ\text{C)}$				$P = 0.10 \text{ MPa (99.61}^\circ\text{C)}$				
Sat.†	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
$P = 0.20 \text{ MPa (120.21}^\circ\text{C)}$				$P = 0.30 \text{ MPa (133.52}^\circ\text{C)}$				$P = 0.40 \text{ MPa (143.61}^\circ\text{C)}$				
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
$P = 2.50 \text{ MPa (223.95}^\circ\text{C)}$				$P = 3.00 \text{ MPa (233.85}^\circ\text{C)}$				$P = 3.50 \text{ MPa (242.56}^\circ\text{C)}$				
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629								
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764
300	0.09894	2762.2	3009.6	6.6459	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103	0.11325	3282.5	3678.9	7.4357
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786



**Propriétés thermodynamiques de l'air comme gaz parfait**

**TABLE A-17**

Ideal-gas properties of air

$T$ K	$h$ kJ/kg	$P_r$	$u$ kJ/kg	$v_r$	$s^\circ$ kJ/kg · K	$T$ K	$h$ kJ/kg	$P_r$	$u$ kJ/kg	$v_r$	$s^\circ$ kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						