



POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL

Questionnaire Contrôle périodique

MEC1210

Sigle du cours

Identification de l'étudiant(e)		
Nom :	Prénom :	
Signature :	Matricule :	Groupe :

Sigle et titre du cours			
MEC1210 – Thermodynamique			
Professeur	Téléphone	Groupe	Trimestre
Huu Duc Vo		1	Automne 2024
Jour	Date	Durée	Heures
Lundi	21 octobre 2024	1h50	12h45 à 14h35
Documentation		Calculatrice	Outils électroniques
<input checked="" type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Toute <input checked="" type="checkbox"/> Voir directives particulières		<input type="checkbox"/> Aucune <input checked="" type="checkbox"/> Toutes <input type="checkbox"/> Non programmable (AEP)	Les appareils électroniques personnels sont interdits.

- Directives particulières**
- Répondre sur le cahier réponse en recto seulement (verso pour brouillon)
 - Ne PAS débrocher le cahier de réponse
 - **IMPORTANT** : Inscrire votre matricule dans la boîte en haut à droite des pages de réponse
 - Demander un cahier supplémentaire au besoin
 - Garder le questionnaire après l'examen
 - **Il faut définir le système pour chaque application de la 1^{ère} loi de la thermodynamique**
 - **Les relations utiles et données thermodynamiques : pages 6 à 8 de ce questionnaire**

Important	Cet examen contient <input type="text" value="3"/> questions sur un total de <input type="text" value="8"/> pages (excluant cette page).
	La pondération de cet examen est de <input type="text" value="30"/> %
	Vous devez répondre sur : <input type="checkbox"/> le questionnaire <input checked="" type="checkbox"/> le cahier <input type="checkbox"/> les deux
	Vous devez remettre le questionnaire : <input type="checkbox"/> oui <input checked="" type="checkbox"/> non

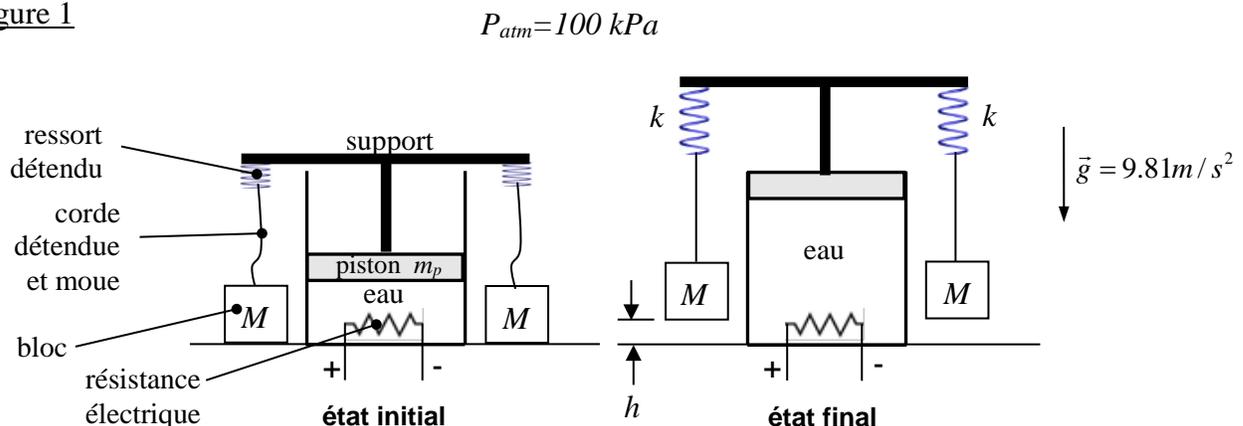
L'étudiant doit honorer l'engagement pris lors de la signature du code de conduite.

Question No. 1 (35 points)

Considérez le cylindre vertical fixe illustré à la figure 1, qui est ouvert en haut et fermé en bas et qui contient un piston ayant une surface de 0.0981 m^2 pour former une cavité renfermant 0.04 kg d'eau et une résistance électrique. Un support symétrique en forme de «T» est attaché sur la face extérieure du piston, donnant une masse combinée piston-support (m_p) de 500 kg . Un bloc d'une masse (M) de 750 kg est suspendu au bout de chacun des deux bras du support via une corde et un ressort linéaire avec une constante (k) de 70.1394 kN/m . Initialement, l'eau dans le cylindre est à 25 °C et les deux blocs M sont sur le sol avec les deux cordes moues et détendues tout comme les deux ressorts. On alimente alors la résistance électrique avec une batterie de 12 Volts pour chauffer l'eau qui prend de l'expansion, faisant monter le piston. Lorsque le piston a monté de $H = 14.17142 \text{ cm}$ de sa position initiale les cordes et les ressorts commencent à sortir de leurs détentes (tension/force encore nulles mais sur le point d'accroître, cordes ne sont plus moues). Le chauffage de l'eau continue, *étirant les ressorts* pour éventuellement soulever les deux blocs M à une hauteur (h) de 4.5102 cm au-dessus du sol à l'état final après un temps de chauffage total de 60 minutes . La pression atmosphérique (P_{atm}) au-dessus du piston est constante à 100 kPa .

Tout le processus est *quasi-statique*. On peut négliger la friction entre le piston et le cylindre, la masse des cordes et ressorts, toute déformation du support, tout changement d'énergie thermique des éléments solides, l'effet gravitationnel sur l'eau ainsi que toute perte de chaleur de l'eau.

Figure 1



On demande de :

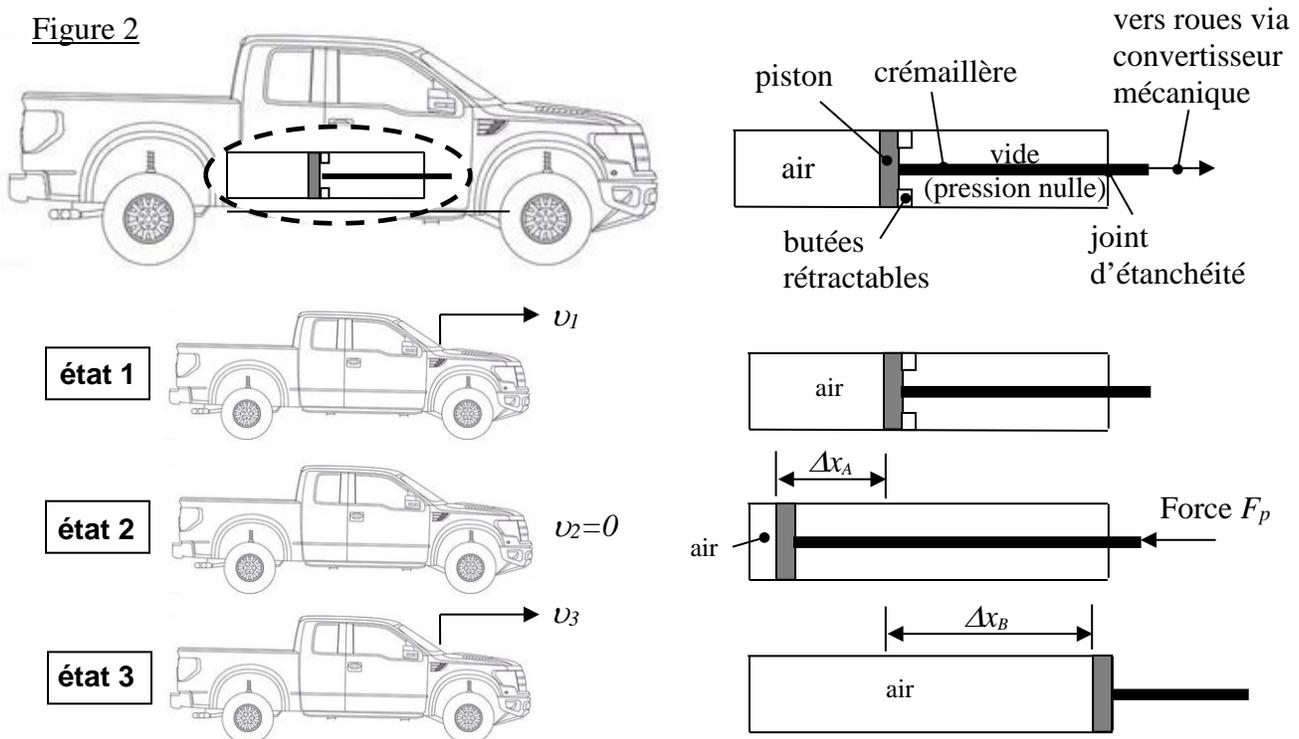
- Déterminer la pression (en kPa) et la phase de l'eau à l'état initial. (3 points)
- Déterminer la pression (en kPa), la température (en °C) **et** la phase de l'eau (*ainsi que le titre si c'est un mélange liquide-vapeur saturé*) (12 points) :
 - lorsque les cordes et ressorts commencent à sortir de leurs détentes
 - au moment où les blocs (M) quitte le sol (effleurent le sol sans y exercer de force)
 - à l'état final
- Tracer qualitativement les états et évolutions de l'eau sur un diagramme P-v (avec dôme de saturation). (5 points)
- Déterminer le travail total fait par l'eau (en kJ). (8 points)
- Le courant électrique tiré par la résistance (en Ampères). (7 points)

Question No. 2 (30 points)

Le principe derrière un véhicule hybride est simplement de stocker l'énergie habituellement perdue lors du freinage dans un médium, habituellement une batterie, qui sert ensuite à faire repartir la voiture sans le moteur à combustion interne. La figure 2 illustre et décrit l'opération d'une variation de ce concept qui met à profit l'énergie thermique des gaz d'échappement.

Une camionnette avec une masse *totale* de 2500 kg est munie d'un long cylindre fermé et étanche avec des butées rétractables et un piston ayant une aire de 0.5 m^2 . La cavité gauche contient 1 kg d'air alors que la cavité droite est évacuée (*pression nulle*) et traversée par une crémaillère de diamètre négligeable connectée au piston. Au début, lorsque le véhicule roule à une vitesse constante $v_1 = 14.8623 \text{ m/s}$, on profite de la chaleur dégagée par les gaz d'échappement pour chauffer l'air via les parois du cylindre jusqu'à ce que ce l'air atteigne une pression de 300 kPa, forçant ainsi le piston contre les butées donnant un volume de 0.507033 m^3 à l'air (état 1). En pressant sur la pédale de frein, le moteur s'arrête et un convertisseur mécanique s'enclenche permettant de convertir la rotation des roues en mouvement de translation de la crémaillère qui pousse le piston à gauche pour comprimer l'air, freinant ainsi la voiture sans utiliser les freins traditionnels. Durant ce freinage, les butées se rétractent. À la fin du freinage, lorsque la vitesse de la voiture est zéro (état 2), le piston s'est déplacé de $\Delta x_A = 70 \text{ cm}$ à la gauche de sa position initiale de l'état 1, comprimant l'air, et un système bloque en place la crémaillère avec une force F_p pour maintenir le piston en place. En lâchant la pédale de frein pour repartir, la crémaillère débloque pour laisser l'air pousser le piston et la crémaillère vers la droite. Le convertisseur mécanique s'inverse pour convertir cette translation en rotation des roues (et accélération du véhicule) pendant que le moteur reste toujours éteint. À la fin de l'expansion (état 3), le piston est à $\Delta x_B = 1 \text{ m}$ à la droite de sa position initiale de l'état 1 et la pression de l'air est de 131.098 kPa. À ce moment, le véhicule a atteint une vitesse v_3 et le convertisseur mécanique se désengage. (Si la vitesse finale voulue est supérieure à v_3 , le moteur s'allume et continue à lui seul l'accélération du véhicule.)

Figure 2



Question No. 2 (suite)

L'air peut être considéré comme un gaz parfait à *chaleurs massiques variables* avec $R = 0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K}$. On peut supposer que les évolutions de l'air entre les états 1 et 3 sont *adiabatiques* et que le véhicule roule sur une surface horizontale entre les états 1 et 2. On peut négliger toute friction et traînée, toutes pertes dans le convertisseur mécanique, ainsi que tout changement d'énergie thermique des éléments solides du véhicule. On peut aussi négliger le changement d'énergie mécanique associée à *la rotation* des roues.

On demande de déterminer:

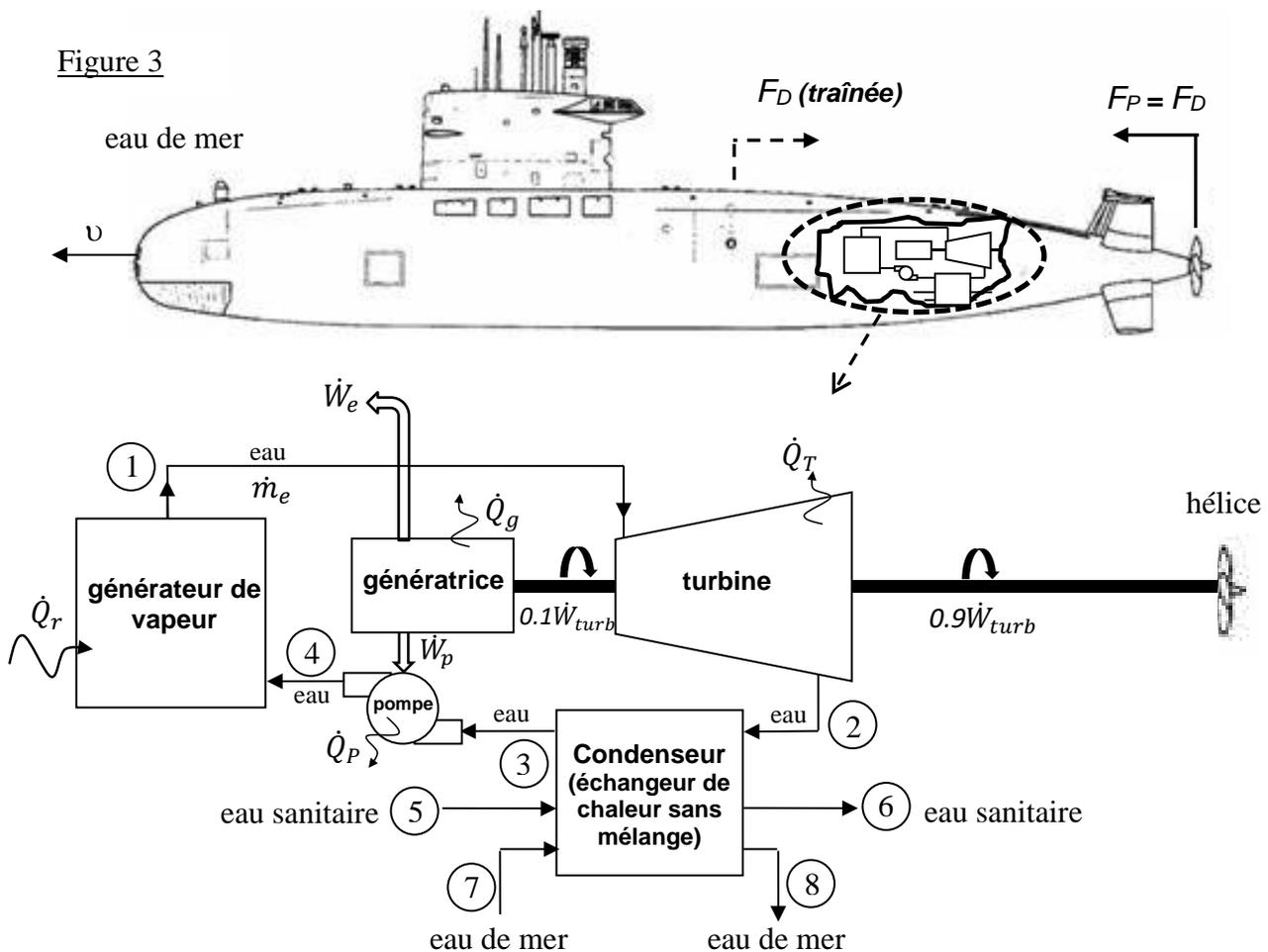
- a) La température (en K) de l'air à l'état 1. (4 points)
- b) La température (en K) de l'air et la force F_p sur la crémaillère (en kN) lorsque le véhicule s'arrête (état 2). (12 points)
- c) La vitesse (en m/s) du véhicule à l'état 3 (v_3) si ce dernier :
 - grimpe une pente haute de 6 m entre les états 2 et 3. (12 points)
 - roule sur une surface horizontale entre les états 2 et 3. (2 points)

Question No. 3 (35 points)

Un certain sous-marin nucléaire dispose du système de propulsion illustré sur la figure 3. Roulant en régime permanent à la puissance maximale, le réacteur nucléaire fournit de la chaleur (\dot{Q}_r) à un générateur de vapeur qui produit $\dot{m}_e = 20 \text{ kg/s}$ de vapeur d'eau entrant dans une turbine à 6 MPa et 600°C avec une vitesse de 30 m/s (état 1) pour en sortir comme *vapeur saturée* à 100 kPa et 5 m/s (état 2). Sur la puissance mécanique produite par la turbine (\dot{W}_{turb}), 90% va à l'hélice pour propulser le sous-marin et le 10% restant fait tourner une génératrice pour produire de l'électricité. La vapeur d'eau sortant de la turbine est condensée dans un échangeur de chaleur *sans mélange* (condenseur) pour sortir comme *liquide saturé* (état 3). Cette eau est ensuite comprimée par une pompe électrique jusqu'à la pression de la chaudière et 110°C (état 4) pour ainsi fermer le cycle. La chaleur récupérée par la condensation de l'eau (entre les états 2 et 3) est utilisée pour chauffer l'eau sanitaire (pour consommation et chauffage) du sous-marin qui entre dans le condenseur avec un débit volumique de $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ à 100 kPa et 20°C (état 5) et en sort à 85°C (état 6). La chaleur restante est dissipée à l'eau de mer pour laquelle l'augmentation de température entre l'entrée (état 7) et la sortie (état 8) du condenseur doit être limitée à 1°C pour éviter la détection du sous-marin par d'autres vaisseaux.

Une partie de la puissance électrique produite par la génératrice alimente la pompe (\dot{W}_p) et le reste (\dot{W}_e) comble les besoins électriques du sous-marin. À cause des pertes, seulement 75% de la puissance mécanique transférée à l'hélice propulse le sous-marin.

Figure 3



Question No. 3 (suite)

La turbine et la pompe perdent de la chaleur (\dot{Q}_T et \dot{Q}_P) à un taux de 1% du taux de transfert d'énergie ($\dot{m}_e \Delta\theta$) par l'eau (turbine) ou à l'eau (pompe). De plus, la génératrice dissipe en chaleur (\dot{Q}_g) 4% de la puissance mécanique qui lui est fournie par la turbine.

On peut négliger les changements d'énergie cinétique des fluides (*excepté pour la turbine*) ainsi que leurs changements d'énergie potentielle. On peut aussi négliger toute perte de chaleur à travers les parois externes du condenseur et des tubes rejoignant les différents éléments du cycle, ainsi que toute perte de pression dans le générateur de vapeur et le condenseur. L'eau de mer peut être considérée comme une substance incompressible avec une masse volumique (densité) de 1028 kg/m^3 et une chaleur massique constante de $4.00 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$.

On demande de déterminer :

- La puissance mécanique (\dot{W}_{turb}) produite par la turbine (en kW). (9 points)
- La puissance électrique nette (\dot{W}_e) pour combler les besoins électriques du sous-marin (en kW). (10 points)
- Le débit volumique minimum d'eau de mer (\dot{V}_7) traversant l'échangeur de chaleur (en m^3/s). (11 points)
- Le rendement propulsif de ce système (en %), défini comme la puissance utile (propulsant le sous-marin) sur le taux de chaleur fourni par le réacteur nucléaire. (5 points)

Bonus (3 points):

La force de traînée de l'eau de mer sur le sous-marin (F_D) (qui doit être contrée par la force de propulsion F_P de l'hélice pour maintenir une vitesse v constante) est donnée par $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D$ où ρ est la masse volumique (densité) de l'eau de mer, v la vitesse du sous-marin par rapport à l'eau de mer, A son aire frontale (100 m^2) et C_D son coefficient de traînée (0.25)

- Déterminer la vitesse maximale du sous-marin par rapport à l'eau de mer (en m/s).

Relations utiles et propriétés thermodynamiques

Énergie stockée dans un ressort linéaire = $\frac{1}{2}k(z - z_{force=0})^2$

Puissance électrique = Voltage · Courant (1 Volt·Ampère = 1 Watt)

Puissance mécanique = Force · Vitesse

Propriétés thermodynamiques de l'eau – tables de saturation

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table

Temp., T °C	Specific volume, m ³ /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
	Sat. press., P _{sat} kPa	Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
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

TABLE A-5

Saturated water—Pressure table

Press., P kPa	Specific volume, m ³ /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
	Sat. temp., T _{sat} °C	Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
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
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
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902

Propriétés thermodynamiques de l'eau – tables de vapeur surchauffée

Superheated water												
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	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 MPa (120.21°C)				P = 0.30 MPa (133.52°C)				P = 0.40 MPa (143.61°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
P = 4.0 MPa (250.35°C)				P = 4.5 MPa (257.44°C)				P = 5.0 MPa (263.94°C)				
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124
P = 6.0 MPa (275.59°C)				P = 7.0 MPa (285.83°C)				P = 8.0 MPa (295.01°C)				
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925

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° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° 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	1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638
						1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510
						1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345
						1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160
						1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959
						1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724
						1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474
						1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200