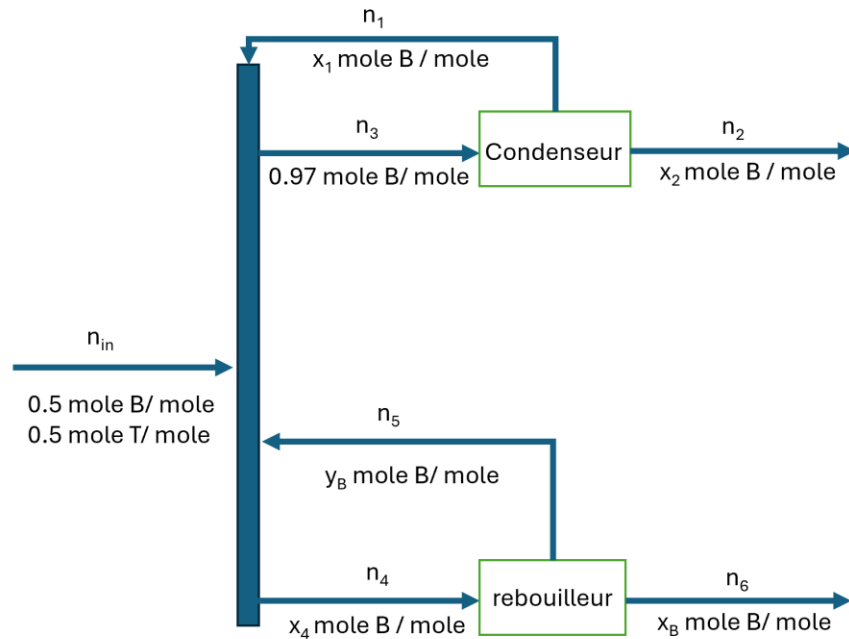


Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

Question #1 : Bilans de matière et d'énergie d'un système non-réactif (25 points)



Une colonne de distillation est présentée à la figure ci-haut. **Un mélange équiolaire** de benzène (B) et de toluène (T) est alimenté à cette dernière. La colonne est chauffée de manière à générer une phase gazeuse au haut de la colonne en équilibre avec une phase liquide récolté au bas du réacteur.

Deux unités supplémentaires sont utilisées pour maximiser le rendement de ce procédé soient **un rebouilleur** au bas de la colonne et un **condenseur** au haut de la colonne. Au haut de la colonne, **le courant de vapeur n_3 contenant 97% de benzène est complètement condensée** et **le courant liquide** résultant est **divisé** en deux courants **égaux**. Le courant de sortie **n_2 contient 89.2% du benzène alimenté à la colonne**.

Au bas de la colonne le courant liquide n_4 est partiellement vaporisé à l'aide du rebouilleur. **Cette unité vaporise 45 % du courant entrant n_4** . Ce courant n_5 est ensuite retourné à la colonne de distillation. Il en résulte alors deux flux dont les fractions molaires en benzène sont liées par l'équation suivante :

$$\frac{y_B/(1 - y_B)}{x_B/(1 - x_B)} = 2.25$$

Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

En utilisant le diagramme d'écoulement complètement annoté (variables) ainsi que les données fournies dans l'énoncé précédent, répondez aux questions suivantes.

- 1) Réalisez une **analyse du nombre de degrés de liberté** vous permettant de confirmer qu'il est possible de complètement résoudre ce problème. Pour ce faire identifier le nombre de variables, le nombre de bilans ainsi que le nombres d'informations supplémentaires. **(6 pts)**

En posant une base de calcul de 100 moles pour n_{in} , évaluez :

- 2) La quantité totale de moles du courant n_2 **(4 pts)**
- 3) Le taux de recouvrement ($\eta = \frac{n_{récolté}}{n_{alimenté}}$) de toluène obtenu grâce au courant n_6 **(9 pts)**
- 4) La fraction de benzène y_B ainsi que la quantité totale de vapeur n_5 retournée à la colonne de distillation par le rebouilleur **(5 pts)**

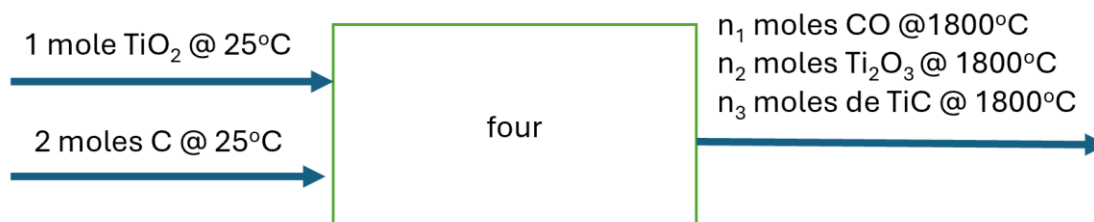
On vous demande maintenant d'analyser ce procédé d'un point de vue thermodynamique

- 5) Définissez l'espèce qui présente la tension de vapeur la plus élevée à la température d'opération de la colonne de distillation. Utilisez les résultats trouvés précédemment pour justifier votre réponse. **(1 pt)**

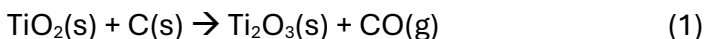
Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

Question #2 : Bilans de matière et d'énergie- système réactif (20 points)

On souhaite réaliser la réduction de l'oxyde de titane TiO_2 au moyen de la carbothemie à une température de 1800°C . Une mole de TiO_2 ainsi que 2 moles de carbone sont alors introduites dans un four.



Les deux réactions non-balancées surviennent simultanément:



En utilisant la méthode des avancements de réaction répondez aux questions suivantes :

- 1) Balancez les deux réactions en compétition. Fournissez les facteurs stœchiométriques pour ces deux réactions. **(4 pts)**
- 2) Sachant qu'il ne reste plus de TiO_2 ou de carbone dans le réacteur, déterminez le nombre de moles de CO, de Ti_2O_3 et de TiC à la sortie du réacteur. **(7 pts)**
- 3) Évaluez la quantité de chaleur nécessaire pour réaliser l'opération sachant que les réactifs entrent à 25°C et que les produits sortent à 1800°C . (voir le tableau à la page suivante). Énoncez clairement vos hypothèses pour réaliser ce bilan d'énergie. **(9 pts)**

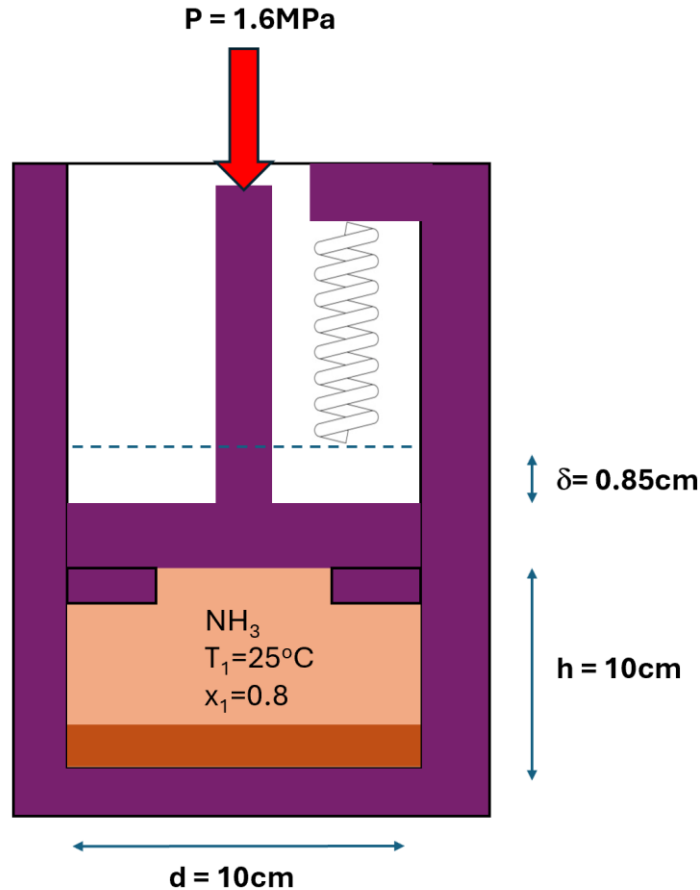
Suite de la question à la page suivante

Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

Espèces	Delta G° de formation (J/mol)	Cp (J/mol/K)
C(s)	0	8.5
TiO ₂ (s)	-952144.2 + 183.152T	55.2
Ti ₂ O ₃ (s)	-1509175.5 + 261.702T	96
TiC(s)	-201637.1 + 23.670T	36.5
CO(g)	-119468.6 - 83.232T	29.1

Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

Question #3 : Application des lois de la thermo. à une substance pure (30 points)



L'assemblage piston cylindre présenté à la figure ci-haut contient un mélange biphasique (titre $x_1=0.8$) d'ammoniac (NH_3) initialement à 25°C . Dans cet état initial, le piston est appuyé sur des butées. Une pression de 1.6MPa est constamment maintenue sur le piston. Un ressort limite le déplacement du piston lorsque ce dernier se déplace de plus de 0.85cm .

On expose alors cet assemblage à une température de 300°C .

Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

Répondez aux questions suivantes :

- 1) Déterminez la quantité d'ammoniac (en grammes) contenue dans cet assemblage. **(6 pts)**
- 2) Évaluez la température de l'ammoniac au moment où le piston commence à se déplacer. **(3 pts)**
- 3) En supposant que la température finale de l'ammoniac est de 300°C et que la pression finale est de 2MPa , déterminez l'interaction de travail totale ainsi que l'interaction de chaleur associée à cette évolution d'état. **(12 pts)**
- 4) Présentez l'ensemble de ces évolutions d'état sur une projection P-V en prenant soin d'identifier chacun des états de ce procédé. Tracez également la cloche du domaine biphasique liquide-gaz sur cette figure. **(4 pts)**
- 5) Évaluez la variation d'entropie totale de ce cette évolution d'état complète en supposant que la température externe est de 300°C . **(5 pts)**

Note : Les tables thermodynamiques de cette substance pure sont présentées en **Annexe 1**.

Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

Question #4 : Équilibre de phases (15 points)

Le diagramme de phases du système binaire A-B ($P_{\text{tot}}=1\text{atm}$) est présenté à la figure ci-dessous. Ce diagramme comprend un composé binaire AB ainsi qu'une solution liquide. Des données thermodynamiques relatives aux substances pures A et B sont fournies dans le tableau 4.1.

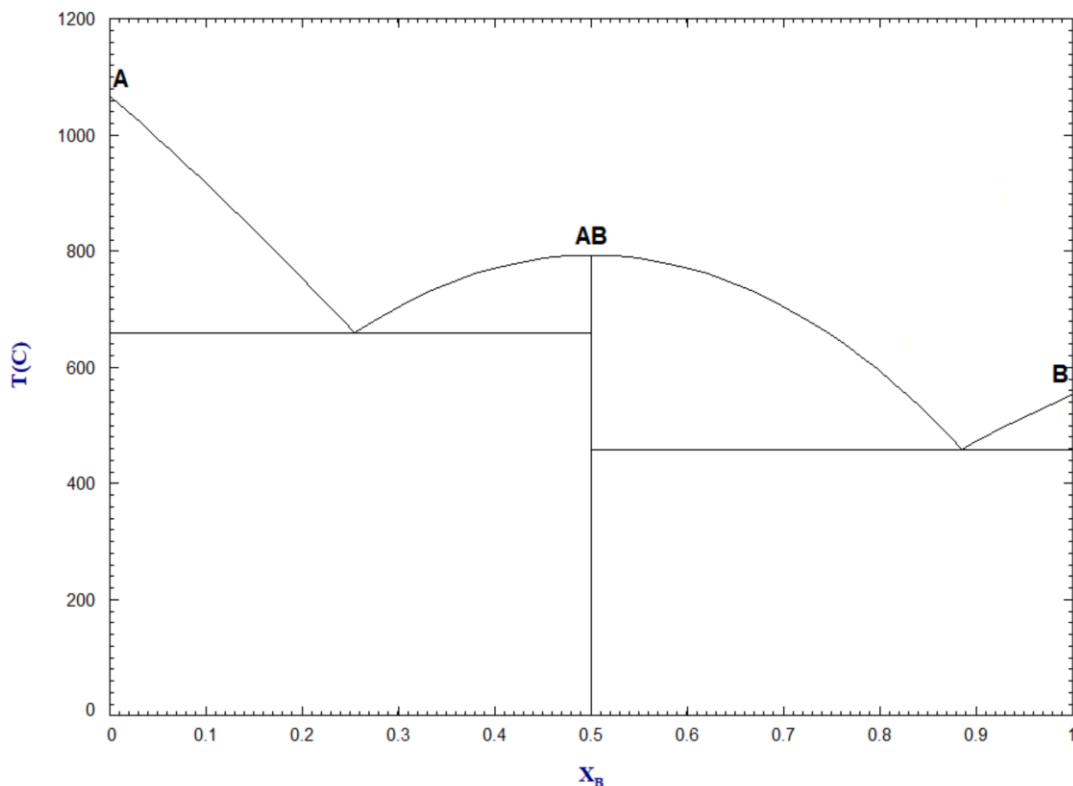


Tableau 4.1 : Propriétés thermo. des substances pures du système A-B

Substance	$h_{298.15\text{K}}$ J/mol	$s_{298.15\text{K}}$ J/mol/K	C_p J/mol/K
A(s)	0	28	25
A(l)	+10711	36	25
B(s)	0	32.5	34
B(l)	+8250	42.5	34
AB(s)	-20000	60.5	59

Suite de la question à la page suivante

Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

Répondez aux questions suivantes:

- 1) On vous demande dans un premier temps d'estimer la solubilité maximale de A dans la solution liquide (A,B) à 800°C en **supposant un comportement idéal** de la solution liquide (A,B) **sans utiliser d'information du diagramme de phases A-B. (9 pts)**
Indice : vous devez utiliser les données thermodynamiques fournies au tableau 4.1.

- 2) Évaluez la solubilité maximale de la substance A dans la solution liquide (A,B) à une température de 800°C en utilisant le diagramme de phases présenté à la figure précédente. **(1 pt)**

- 3) La différence entre les valeurs calculées en 1) et 2) s'explique par le fait que la solution liquide (A,B) est décrite par un modèle de Margules à 2 suffixes (aussi appelée solution régulière). En utilisant le diagramme de phases et les données thermodynamiques du tableau 4.1, évaluez le terme A du modèle de Margules (sachant $g^E = AX_A X_B$). Énoncez clairement vos hypothèses. **(5 pts)**

Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

Question #5 : Cycle de réfrigération (10 points)

On souhaite refroidir continuellement de l'eau de 23°C à 5°C. Pour ce faire, on utilise un frigo d'une puissance de 2.65kW situé dans une cuisine dont la température est de 21°C. Ce frigo rejette de la chaleur dans l'environnement de la cuisine à un taux de 570kJ/min.

Répondez aux questions suivantes

- 1) Décrivez les 4 unités nécessaires pour faire fonctionner le frigo en associant les transferts de chaleur (\dot{Q}_H et \dot{Q}_L) et les interactions de travail \dot{W} à ces unités. Définissez le signe de chaque interaction de chaleur et de travail. (2 pts)
- 2) En supposant que le frigo fonctionne selon **un cycle de Carnot idéal** utilisant un fluide réfrigérant passant de l'état liquide à l'état gazeux (et vice et versa) pendant le cycle, présentez les évolutions d'état associées à chaque unité identifié en 1) en présentant la cloche du domaine biphasique (liquide+gaz) du fluide réfrigérant. (2 pts)

Note importante: À la température haute T_H , le fluide réfrigérant passe d'une vapeur surchauffée à un liquide saturé, alors qu'à la température basse T_L , le fluide réfrigérant passe d'un état biphasique (liquide+gaz) à une vapeur saturée.

- 3) Évaluez le coefficient de performance (COP) réel de ce frigo ainsi que le débit volumique (litres/min) d'eau qu'il peut traiter. (6 pts)

Info. Supplémentaires :

C_p de l'eau liquide = 4.18 kJ/kg/°C

ρ de l'eau liquide = 1000kg/m³

Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

Annexe 1 : Propriétés thermodynamiques de l'ammoniac

TABLE B.2.1
Saturated Ammonia

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Specific Volume, m ³ /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. Vapor u_g
-50	40.9	0.001424	2.62557	2.62700	-43.82	1309.1	1265.2
-45	54.5	0.001437	2.00489	2.00632	-22.01	1293.5	1271.4
-40	71.7	0.001450	1.55111	1.55256	-0.10	1277.6	1277.4
-35	93.2	0.001463	1.21466	1.21613	21.93	1261.3	1283.3
-30	119.5	0.001476	0.96192	0.96339	44.08	1244.8	1288.9
-25	151.6	0.001490	0.76970	0.77119	66.36	1227.9	1294.3
-20	190.2	0.001504	0.62184	0.62334	88.76	1210.7	1299.5
-15	236.3	0.001519	0.50686	0.50838	111.30	1193.2	1304.5
-10	290.9	0.001534	0.41655	0.41808	133.96	1175.2	1309.2
-5	354.9	0.001550	0.34493	0.34648	156.76	1157.0	1313.7
0	429.6	0.001566	0.28763	0.28920	179.69	1138.3	1318.0
5	515.9	0.001583	0.24140	0.24299	202.77	1119.2	1322.0
10	615.2	0.001600	0.20381	0.20541	225.99	1099.7	1325.7
15	728.6	0.001619	0.17300	0.17462	249.36	1079.7	1329.1
20	857.5	0.001638	0.14758	0.14922	272.89	1059.3	1332.2
25	1003.2	0.001658	0.12647	0.12813	296.59	1038.4	1335.0
30	1167.0	0.001680	0.10881	0.11049	320.46	1016.9	1337.4
35	1350.4	0.001702	0.09397	0.09567	344.50	994.9	1339.4
40	1554.9	0.001725	0.08141	0.08313	368.74	972.2	1341.0
45	1782.0	0.001750	0.07073	0.07248	393.19	948.9	1342.1
50	2033.1	0.001777	0.06159	0.06337	417.87	924.8	1342.7
55	2310.1	0.001804	0.05375	0.05555	442.79	899.9	1342.7
60	2614.4	0.001834	0.04697	0.04880	467.99	874.2	1342.1
65	2947.8	0.001866	0.04109	0.04296	493.51	847.4	1340.9
70	3312.0	0.001900	0.03597	0.03787	519.39	819.5	1338.9
75	3709.0	0.001937	0.03148	0.03341	545.70	790.4	1336.1
80	4140.5	0.001978	0.02753	0.02951	572.50	759.9	1332.4
85	4608.6	0.002022	0.02404	0.02606	599.90	727.8	1327.7
90	5115.3	0.002071	0.02093	0.02300	627.99	693.7	1321.7
95	5662.9	0.002126	0.01815	0.02028	656.95	657.4	1314.4
100	6253.7	0.002188	0.01565	0.01784	686.96	618.4	1305.3
105	6890.4	0.002261	0.01337	0.01564	718.30	575.9	1294.2
110	7575.7	0.002347	0.01128	0.01363	751.37	529.1	1280.5
115	8313.3	0.002452	0.00933	0.01178	786.82	476.2	1263.1
120	9107.2	0.002589	0.00744	0.01003	825.77	414.5	1240.3
125	9963.5	0.002783	0.00554	0.00833	870.69	337.7	1208.4
130	10891.6	0.003122	0.00337	0.00649	929.29	226.9	1156.2
132.3	11333.2	0.004255	0	0.00426	1037.62	0	1037.6

Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

TABLE B.2.1 (continued)
 Saturated Ammonia

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg-K		
		Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. Vapor s_g
-50	40.9	-43.76	1416.3	1372.6	-0.1916	6.3470	6.1554
-45	54.5	-21.94	1402.8	1380.8	-0.0950	6.1484	6.0534
-40	71.7	0	1388.8	1388.8	0	5.9567	5.9567
-35	93.2	22.06	1374.5	1396.5	0.0935	5.7715	5.8650
-30	119.5	44.26	1359.8	1404.0	0.1856	5.5922	5.7778
-25	151.6	66.58	1344.6	1411.2	0.2763	5.4185	5.6947
-20	190.2	89.05	1329.0	1418.0	0.3657	5.2498	5.6155
-15	236.3	111.66	1312.9	1424.6	0.4538	5.0859	5.5397
-10	290.9	134.41	1296.4	1430.8	0.5408	4.9265	5.4673
-5	354.9	157.31	1279.4	1436.7	0.6266	4.7711	5.3977
0	429.6	180.36	1261.8	1442.2	0.7114	4.6195	5.3309
5	515.9	203.58	1243.7	1447.3	0.7951	4.4715	5.2666
10	615.2	226.97	1225.1	1452.0	0.8779	4.3266	5.2045
15	728.6	250.54	1205.8	1456.3	0.9598	4.1846	5.1444
20	857.5	274.30	1185.9	1460.2	1.0408	4.0452	5.0860
25	1003.2	298.25	1165.2	1463.5	1.1210	3.9083	5.0293
30	1167.0	322.42	1143.9	1466.3	1.2005	3.7734	4.9738
35	1350.4	346.80	1121.8	1468.6	1.2792	3.6403	4.9196
40	1554.9	371.43	1098.8	1470.2	1.3574	3.5088	4.8662
45	1782.0	396.31	1074.9	1471.2	1.4350	3.3786	4.8136
50	2033.1	421.48	1050.0	1471.5	1.5121	3.2493	4.7614
55	2310.1	446.96	1024.1	1471.0	1.5888	3.1208	4.7095
60	2614.4	472.79	997.0	1469.7	1.6652	2.9925	4.6577
65	2947.8	499.01	968.5	1467.5	1.7415	2.8642	4.6057
70	3312.0	525.69	938.7	1464.4	1.8178	2.7354	4.5533
75	3709.0	552.88	907.2	1460.1	1.8943	2.6058	4.5001
80	4140.5	580.69	873.9	1454.6	1.9712	2.4746	4.4458
85	4608.6	609.21	838.6	1447.8	2.0488	2.3413	4.3901
90	5115.3	638.59	800.8	1439.4	2.1273	2.2051	4.3325
95	5662.9	668.99	760.2	1429.2	2.2073	2.0650	4.2723
100	6253.7	700.64	716.2	1416.9	2.2893	1.9195	4.2088
105	6890.4	733.87	668.1	1402.0	2.3740	1.7667	4.1407
110	7575.7	769.15	614.6	1383.7	2.4625	1.6040	4.0665
115	8313.3	807.21	553.8	1361.0	2.5566	1.4267	3.9833
120	9107.2	849.36	482.3	1331.7	2.6593	1.2268	3.8861
125	9963.5	898.42	393.0	1291.4	2.7775	0.9870	3.7645
130	10892	963.29	263.7	1227.0	2.9326	0.6540	3.5866
132.3	11333	1085.85	0	1085.9	3.2316	0	3.2316

Examen OIQ 23-CH-A1
Printemps 2025
Bilan des transformations et thermodynamique chimique

TABLE B.2.2 (continued)
Superheated Ammonia

Temp. (°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)
1600 kPa (41.03°C)					2000 kPa (49.37°C)			
Sat.	0.08079	1341.2	1470.5	4.8553	0.06444	1342.6	1471.5	4.7680
50	0.08506	1364.9	1501.0	4.9510	0.06471	1344.5	1473.9	4.7754
60	0.08951	1389.3	1532.5	5.0472	0.06875	1372.3	1509.8	4.8848
70	0.09372	1412.3	1562.3	5.1351	0.07246	1397.8	1542.7	4.9821
80	0.09774	1434.3	1590.6	5.2167	0.07595	1421.6	1573.5	5.0707
100	0.10539	1476.2	1644.8	5.3659	0.08248	1466.1	1631.1	5.2294
120	0.11268	1516.6	1696.9	5.5018	0.08861	1508.3	1685.5	5.3714
140	0.11974	1556.4	1748.0	5.6286	0.09447	1549.3	1738.2	5.5022
160	0.12662	1596.1	1798.7	5.7485	0.10016	1589.9	1790.2	5.6251
180	0.13339	1636.1	1849.5	5.8631	0.10571	1630.6	1842.0	5.7420
200	0.14005	1676.5	1900.5	5.9734	0.11116	1671.6	1893.9	5.8540
220	0.14663	1717.4	1952.0	6.0800	0.11652	1713.1	1946.1	5.9621
240	0.15314	1759.0	2004.1	6.1834	0.12182	1755.2	1998.8	6.0668
260	0.15959	1801.3	2056.7	6.2839	0.12705	1797.9	2052.0	6.1685
280	0.16599	1844.3	2109.9	6.3819	0.13224	1841.3	2105.8	6.2675
300	0.17234	1888.0	2163.7	6.4775	0.13737	1885.4	2160.1	6.3641
320	0.17865	1932.4	2218.2	6.5710	0.14246	1930.2	2215.1	6.4583
340	0.18492	1977.5	2273.4	6.6624	0.14751	1975.6	2270.7	6.5505
360	0.19115	2023.3	2329.1	6.7519	0.15253	2021.8	2326.8	6.6406
5000 kPa (88.90°C)					10000 kPa (125.20°C)			
Sat.	0.02365	1323.2	1441.4	4.3454	0.00826	1206.8	1289.4	3.7587
100	0.02636	1369.7	1501.5	4.5091	—	—	—	—
120	0.03024	1435.1	1586.3	4.7306	—	—	—	—
140	0.03350	1489.8	1657.3	4.9068	0.01195	1341.8	1461.3	4.1839
160	0.03643	1539.5	1721.7	5.0591	0.01461	1432.2	1578.3	4.4610
180	0.03916	1586.9	1782.7	5.1968	0.01666	1500.6	1667.2	4.6617
200	0.04174	1633.1	1841.8	5.3245	0.01842	1560.3	1744.5	4.8287
220	0.04422	1678.9	1900.0	5.4450	0.02001	1615.8	1816.0	4.9767
240	0.04662	1724.8	1957.9	5.5600	0.02150	1669.2	1884.2	5.1123
260	0.04895	1770.9	2015.6	5.6704	0.02290	1721.6	1950.6	5.2392
280	0.05123	1817.4	2073.6	5.7771	0.02424	1773.6	2015.9	5.3596
300	0.05346	1864.5	2131.8	5.8805	0.02552	1825.5	2080.7	5.4746
320	0.05565	1912.1	2190.3	5.9809	0.02676	1877.6	2145.2	5.5852
340	0.05779	1960.3	2249.2	6.0786	0.02796	1930.0	2209.6	5.6921
360	0.05990	2009.1	2308.6	6.1738	0.02913	1982.8	2274.1	5.7955
380	0.06198	2058.5	2368.4	6.2668	0.03026	2036.1	2338.7	5.8960
400	0.06403	2108.4	2428.6	6.3576	0.03137	2089.8	2403.5	5.9937
420	0.06606	2159.0	2489.3	6.4464	0.03245	2143.9	2468.5	6.0888
440	0.06806	2210.1	2550.4	6.5334	0.03351	2198.5	2533.7	6.1815