

Vendredi 13 novembre 2015

- Durée 2h00 - Fiche A4 manuscrite personnelle autorisée.
- Documents joints : Tables de saturation de l'eau et du CO_2 (Réfrigérant R744), table de la vapeur surchauffée du CO_2 , Diagramme enthalpique du CO_2 , Diagramme de l'air humide à pression atmosphérique.

1 Machine frigorifique au dioxyde de carbone (CO_2) :

La plupart des fluides frigorigènes actuellement utilisés sont des HFC (HydroFluoroCarbures) qui ont été mis sur le marché en remplacement des CFC (ChloroFluoroCarbures) interdits à la suite de la conférence de Montréal (1988) en raison de leur action sur la couche d'ozone. Or la plupart de ces fluides sont des gaz ayant un fort impact sur le réchauffement planétaire. A l'heure actuelle, à la suite de la conférence de Kyoto (COP 3, 1997), les nations industrialisées s'engagent à réduire l'émission des gaz à effet de serre et s'apprêtent à réduire et même à interdire l'usage de la plupart des HFC. C'est la raison pour laquelle les industries du froid et de la pompe à chaleur se tournent de plus en plus vers des solutions alternatives telles que l'utilisation du CO_2 comme fluide frigorigène.

Nous considérons dans la suite l'étage basse température d'une installation de réfrigération dite "en cascade". Cet étage basse température fonctionne avec le CO_2 (ou R744) comme fluide frigorigène. Il est constitué d'un compresseur d'un condenseur, d'une vanne de détente ainsi que d'un évaporateur. L'état thermodynamique du fluide est dénoté par les indices précisés ci-dessous :

- point A : entrée de l'évaporateur
- point B : entrée du compresseur
- point C : entrée du condenseur
- Point D : entrée du détendeur

On estime que le fluide sortant du condenseur est un liquide saturé. En revanche, le fluide sortant de l'évaporateur sera considéré comme surchauffé. La vanne de détente est réglée de telle sorte que la surchauffe reste égale à 5°C . On fera les hypothèses habituelles pour l'étude théorique du système en régime permanent, à savoir :

- Les évolutions sont isobares dans les deux échangeurs de chaleur.
- La détente est isenthalpique.
- Les variations d'énergie cinétique seront négligées pour chacun des organes de la machine.

La température à la sortie du condenseur est égale à 10°C et la température à l'entrée de l'évaporateur est égale à -30°C (moins trente). La température à la sortie du compresseur est égale à 65°C .

1. Placer le point D sur le diagramme enthalpique du CO_2 puis déterminer l'enthalpie massique et l'entropie massique correspondantes à l'aide des tables fournies. Puis les reporter dans le tableau sur la feuille à rendre. Faites une phrase en Français pour expliquer la façon dont vous avez procédé et ce qui la justifie.
 2. De même, pour le point B, placer le point, expliquer et reporter dans le tableau.
 3. De même pour le point C.
 4. Placez le point A sur le diagramme et expliquez la procédure.
 5. Calculez le titre de vapeur au point A en utilisant les valeurs fournies par les tables.
 6. Calculer l'enthalpie massique et l'entropie massique au point A.
 7. L'évolution dans le compresseur est elle isentropique. Votre réponse doit être justifiée. (réponse non justifiée = 0 pt)
 8. La machine est utilisée pour refroidir un local de stockage. Un ventilateur souffle de l'air sur les tubes de l'évaporateur à raison de 4,42 kg/s. La température de l'air soufflé passe de -18°C à -25°C . Calculer la puissance frigorifique nécessaire.
 9. En déduire le débit du CO_2 dans l'étage basse température de la machine. Explicitez votre raisonnement.
 10. Calculer la puissance mécanique absorbée par le fluide dans le compresseur.
 11. Question subsidiaire : Quelle doit être la puissance frigorifique de l'étage haute température ? Le schéma de l'ensemble de l'installation est donné à la figure 1.
- On donne : Chaleur massique de l'air : $c_p = 1000 \text{ J/K}^{-1} \text{ Kg}^{-1}$

2 Humidification

Dans une installation de conditionnement d'air, une section est dédiée à l'humidification par injection de vapeur. L'air entrant est à la température $t_1 = 20^\circ\text{C}$ et son degré hygrométrique est de 30 %. A la sortie de l'humidificateur, la température mesurée est de 21°C et l'humidité de 91,4 %. On considère que la pression totale reste constante et égale à 1 bar.

1. Calculer la pression partielle de la vapeur d'eau puis l'humidité absolue pour le flux d'air entrant dans l'humidificateur.
2. Calculer l'enthalpie de l'unité d'air humide (par kg d'air sec) pour le flux d'air aspiré entrant.
3. Calculer la pression partielle de la vapeur d'eau puis l'humidité absolue pour le flux d'air sortant de l'humidificateur.
4. Calculer l'enthalpie de l'unité d'air humide (par kg d'air sec) pour le flux d'air sortant.
5. Calculer l'enthalpie massique de la vapeur d'eau injectée dans le flux d'air.
6. On mesure la consommation de vapeur d'eau injectée en une heure et on obtient : 3,52 kg. En déduire le débit d'air sec traversant l'humidificateur.

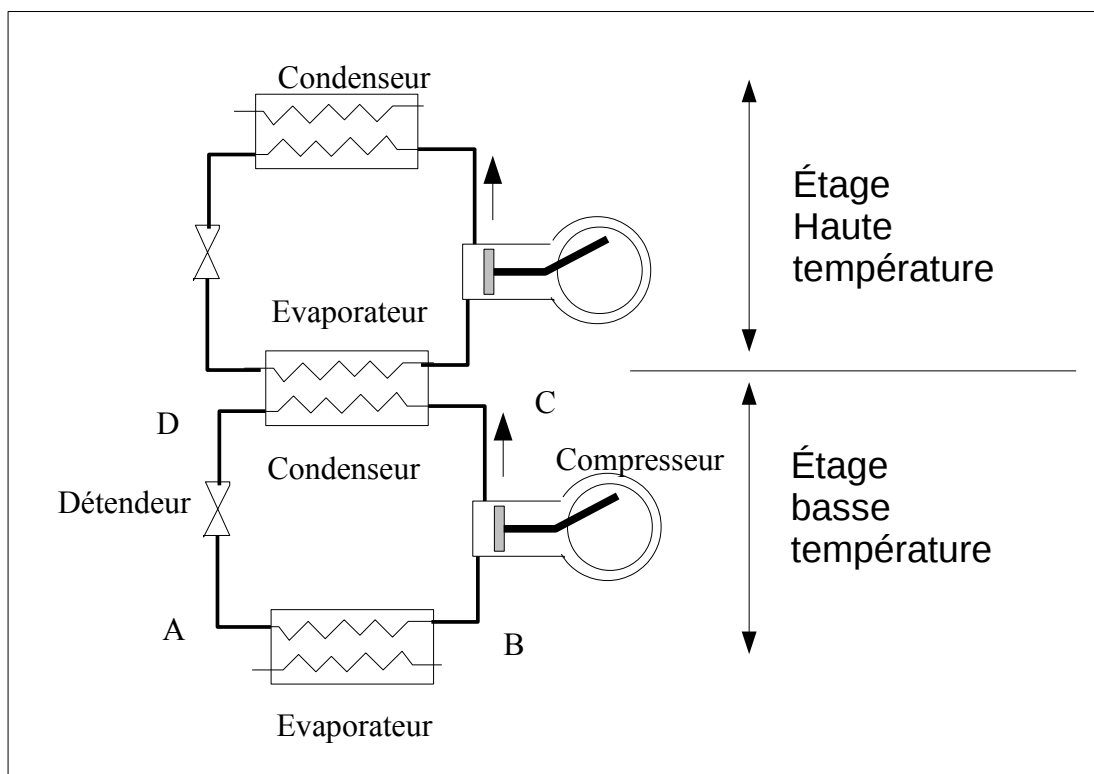


FIGURE 1 – Schéma général de l'installation

Feuille à rendre

Nom ou N° de copie :

grandeur	unité	A	B	C	D
Température	°C				
Pression	Bar				
Enthalpie massique	kJ/kg				
Entropie massique	kJ/K.kg				
Titre de vapeur	-				

Saturation Properties for Carbon dioxide — Temperature Increments

Liquid Phase Data

Data on Saturation Curve

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (kg/m ³)	Volume (m ³ /kg)	Internal Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (J/g*K)	Cv (J/g*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)	Joule-Thomson (K/bar)	Viscosity (uPa*s)	Therm. Cond. (W/m*K)	Surf. Tension (N/m)	Phase
-50.000	6.8234	1154.6	0.00086613	92.352	92.943	0.57939	0.96551	1.9712	928.50	-0.011908	229.30	0.17206	0.015532	liquid
-45.000	8.3184	1135.8	0.00088046	102.14	102.87	0.62282	0.95898	1.9892	892.45	-0.0096311	210.68	0.16563	0.014316	liquid
-40.000	10.045	1116.4	0.00089572	112.00	112.90	0.66564	0.95289	2.0117	856.30	-0.0069889	193.75	0.15930	0.013121	liquid
-35.000	12.024	1096.4	0.00091204	121.95	123.05	0.70794	0.94729	2.0393	819.93	-0.0039116	178.33	0.15304	0.011950	liquid
-30.000	14.278	1075.7	0.00092960	132.01	133.34	0.74982	0.94224	2.0731	783.17	-0.00030855	164.22	0.14686	0.010803	liquid
-25.000	16.827	1054.2	0.00094860	142.20	143.79	0.79141	0.93785	2.1145	745.82	0.0039412	151.26	0.14073	0.0096826	liquid
-20.000	19.696	1031.7	0.00096931	152.54	154.45	0.83283	0.93437	2.1653	707.52	0.0090014	139.33	0.13464	0.0085898	liquid
-15.000	22.908	1008.0	0.00099208	163.07	165.34	0.87421	0.93241	2.2283	667.77	0.015092	128.29	0.12859	0.0075265	liquid
-10.000	26.487	982.93	0.0010174	173.83	176.52	0.91571	0.93300	2.3072	626.06	0.022511	118.02	0.12254	0.0064953	liquid
-5.0000	30.459	956.21	0.0010458	184.86	188.05	0.95756	0.93711	2.4085	582.19	0.031682	108.42	0.11650	0.0054987	liquid
0.0000	34.851	927.43	0.0010782	196.24	200.00	1.0000	0.94493	2.5423	536.44	0.043249	99.394	0.11043	0.0045403	liquid
5.0000	39.695	896.03	0.0011160	208.07	212.50	1.0434	0.95581	2.7268	489.28	0.058236	90.816	0.10431	0.0036243	liquid
10.000	45.022	861.12	0.0011613	220.50	225.73	1.0884	0.96913	2.9976	440.97	0.078356	82.557	0.098119	0.0027567	liquid
15.000	50.871	821.21	0.0012177	233.79	239.99	1.1359	0.98587	3.4360	391.10	0.10670	74.433	0.091862	0.0019456	liquid
20.000	57.291	773.39	0.0012930	248.46	255.87	1.1877	1.0114	4.2637	337.65	0.14973	66.148	0.085683	0.0012034	liquid
25.000	64.342	710.50	0.0014075	265.73	274.78	1.2485	1.0704	6.4674	274.26	0.22565	57.048	0.080789	0.00055276	liquid
30.000	72.137	593.31	0.0016855	292.40	304.55	1.3435	1.4063	35.338	177.23	0.42789	43.768	0.095356	5.4485e-05	liquid

Vapor Phase Data

Data on Saturation Curve

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (kg/m ³)	Volume (m ³ /kg)	Internal Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (J/g*K)	Cv (J/g*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)	Joule-Thomson (K/bar)	Viscosity (uPa*s)	Therm. Cond. (W/m*K)	Phase
-50.000	6.8234	17.925	0.055789	394.61	432.68	2.1018	0.64831	0.95194	223.39	2.4143	11.307	0.011578	vapor
-45.000	8.3184	21.717	0.046046	395.83	434.13	2.0747	0.66398	0.98996	223.57	2.2765	11.585	0.012041	vapor
-40.000	10.045	26.121	0.038284	396.87	435.32	2.0485	0.68068	1.0333	223.50	2.1512	11.869	0.012540	vapor
-35.000	12.024	31.216	0.032035	397.71	436.23	2.0230	0.69847	1.0830	223.15	2.0368	12.161	0.013084	vapor
-30.000	14.278	37.098	0.026956	398.33	436.82	1.9980	0.71745	1.1406	222.54	1.9318	12.464	0.013680	vapor
-25.000	16.827	43.880	0.022789	398.71	437.06	1.9732	0.73789	1.2083	221.63	1.8347	12.781	0.014344	vapor
-20.000	19.696	51.700	0.019343	398.79	436.89	1.9485	0.76021	1.2893	220.41	1.7440	13.115	0.015093	vapor
-15.000	22.908	60.728	0.016467	398.55	436.27	1.9237	0.78467	1.3877	218.85	1.6583	13.474	0.015953	vapor
-10.000	26.487	71.185	0.014048	397.93	435.14	1.8985	0.81130	1.5091	216.94	1.5768	13.863	0.016960	vapor
-5.0000	30.459	83.359	0.011996	396.84	433.38	1.8725	0.84026	1.6628	214.68	1.4987	14.295	0.018171	vapor
0.0000	34.851	97.647	0.010241	395.20	430.89	1.8453	0.87220	1.8648	212.04	1.4227	14.786	0.019671	vapor
5.0000	39.695	114.62	0.0087244	392.85	427.48	1.8163	0.90835	2.1440	208.97	1.3469	15.361	0.021601	vapor
10.000	45.022	135.16	0.0073988	389.57	422.88	1.7847	0.95074	2.5578	205.41	1.2689	16.059	0.024206	vapor
15.000	50.871	160.73	0.0062216	384.99	416.64	1.7489	1.0029	3.2371	201.21	1.1847	16.952	0.027961	vapor
20.000	57.291	194.20	0.0051493	378.36	407.87	1.7062	1.0725	4.5599	196.09	1.0877	18.187	0.033943	vapor
25.000	64.342	242.73	0.0041198	367.92	394.43	1.6498	1.1819	8.2123	189.12	0.96220	20.157	0.045509	vapor
30.000	72.137	345.10	0.0028977	344.23	365.13	1.5433	1.5228	55.822	171.26	0.73936	25.170	0.098023	vapor

Reference States

Internal energy	U = 0 at 273.16 K for saturated liquid.
Entropy	S = 0 at 273.16 K for saturated liquid.

Copyright for NIST Standard Reference Data is governed by the [Standard Reference Data Act](#).

Isobaric Properties for Carbon dioxide

Isobaric Data for P = 45.022 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (kg/m3)	Volume (m3/kg)	Internal Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (J/g*K)	Cv (J/g*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)	Joule-Thomson (K/bar)	Viscosity (uPa*s)	Therm. Cond. (W/m*K)	Phase
10.000	45.022	135.16	0.0073988	389.57	422.88	1.7847	0.95074	2.5578	205.41	1.2689	16.059	0.024206	vapor
15.000	45.022	124.63	0.0080236	398.04	434.16	1.8242	0.88543	2.0283	214.25	1.2081	16.063	0.022649	vapor
20.000	45.022	116.98	0.0085487	405.10	443.58	1.8566	0.84874	1.7640	221.30	1.1507	16.143	0.021967	vapor
25.000	45.022	110.91	0.0090162	411.38	451.97	1.8850	0.82497	1.6017	227.35	1.0974	16.261	0.021659	vapor
30.000	45.022	105.88	0.0094451	417.16	459.69	1.9106	0.80859	1.4911	232.71	1.0479	16.404	0.021553	vapor
35.000	45.022	101.57	0.0098458	422.60	466.93	1.9343	0.79686	1.4107	237.60	1.0019	16.564	0.021572	vapor
40.000	45.022	97.800	0.010225	427.79	473.82	1.9565	0.78826	1.3496	242.11	0.95915	16.735	0.021674	vapor
45.000	45.022	94.456	0.010587	432.78	480.45	1.9775	0.78191	1.3018	246.32	0.91924	16.915	0.021834	vapor
50.000	45.022	91.451	0.010935	437.63	486.86	1.9975	0.77727	1.2634	250.29	0.88190	17.101	0.022038	vapor
55.000	45.022	88.725	0.011271	442.35	493.09	2.0167	0.77397	1.2322	254.05	0.84687	17.293	0.022274	vapor
60.000	45.022	86.231	0.011597	446.98	499.19	2.0351	0.77171	1.2064	257.63	0.81394	17.489	0.022536	vapor
65.000	45.022	83.935	0.011914	451.53	505.16	2.0529	0.77029	1.1848	261.07	0.78294	17.687	0.022819	vapor
70.000	45.022	81.808	0.012224	456.01	511.04	2.0702	0.76953	1.1667	264.36	0.75371	17.889	0.023118	vapor
75.000	45.022	79.829	0.012527	460.44	516.84	2.0869	0.76931	1.1512	267.54	0.72612	18.093	0.023431	vapor
80.000	45.022	77.980	0.012824	464.82	522.56	2.1032	0.76953	1.1381	270.62	0.70004	18.298	0.023755	vapor
85.000	45.022	76.245	0.013116	469.17	528.22	2.1192	0.77014	1.1268	273.59	0.67535	18.504	0.024089	vapor
90.000	45.022	74.612	0.013403	473.49	533.83	2.1347	0.77106	1.1172	276.49	0.65196	18.712	0.024431	vapor

Isobaric Data for P = 14.278 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (kg/m3)	Volume (m3/kg)	Internal Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (J/g*K)	Cv (J/g*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)	Joule-Thomson (K/bar)	Viscosity (uPa*s)	Therm. Cond. (W/m*K)	Phase
-30.000	14.278	37.099	0.026955	398.33	436.82	1.9980	0.71745	1.1406	222.54	1.9318	12.464	0.013680	vapor
-25.000	14.278	35.790	0.027941	402.52	442.42	2.0207	0.70822	1.1002	226.54	1.8183	12.701	0.013947	vapor
-20.000	14.278	34.615	0.028889	406.59	447.84	2.0424	0.70092	1.0682	230.32	1.7158	12.940	0.014237	vapor
-15.000	14.278	33.548	0.029808	410.55	453.11	2.0630	0.69555	1.0430	233.91	1.6228	13.178	0.014544	vapor
-10.000	14.278	32.572	0.030701	414.44	458.27	2.0828	0.69188	1.0230	237.32	1.5378	13.418	0.014865	vapor
-5.0000	14.278	31.672	0.031574	418.27	463.35	2.1019	0.68962	1.0071	240.59	1.4598	13.657	0.015198	vapor
0.0000	14.278	30.838	0.032428	422.05	468.35	2.1204	0.68848	0.99450	243.74	1.3879	13.896	0.015542	vapor
5.0000	14.278	30.060	0.033267	425.80	473.30	2.1383	0.68824	0.98440	246.76	1.3215	14.136	0.015895	vapor
10.000	14.278	29.332	0.034092	429.52	478.20	2.1558	0.68871	0.97635	249.69	1.2600	14.375	0.016255	vapor

Reference States

Internal energy	U = 0 at 273.16 K for saturated liquid.
Entropy	S = 0 at 273.16 K for saturated liquid.

Notes

Copyright for NIST Standard Reference Data is governed by the [Standard Reference Data Act](#).

Saturation Properties for Water — Temperature Increments

Liquid Phase Data

Data on Saturation Curve

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (kg/m ³)	Volume (m ³ /kg)	Internal Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (J/g*K)	Cv (J/g*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)	Joule- Thomson (K/bar)	Viscosity (uPa*s)	Therm. Cond. (W/m*K)	Surf. Tension (N/m)	Phase
5.0000	0.0087258	999.92	0.0010001	21.019	21.020	0.076254	4.2053	4.2055	1426.0	-0.023676	1518.3	0.57052	0.074942	liquid
6.0000	0.0093536	999.89	0.0010001	25.223	25.224	0.091342	4.2026	4.2032	1430.4	-0.023588	1471.6	0.57242	0.074799	liquid
7.0000	0.010021	999.86	0.0010001	29.425	29.426	0.10637	4.1998	4.2010	1434.8	-0.023502	1427.2	0.57432	0.074655	liquid
8.0000	0.010730	999.80	0.0010002	33.626	33.627	0.12133	4.1970	4.1991	1439.0	-0.023417	1384.8	0.57622	0.074511	liquid
9.0000	0.011483	999.74	0.0010003	37.824	37.825	0.13624	4.1940	4.1972	1443.1	-0.023333	1344.5	0.57811	0.074366	liquid
10.000	0.012282	999.65	0.0010003	42.020	42.021	0.15109	4.1910	4.1955	1447.1	-0.023251	1306.0	0.58000	0.074221	liquid
11.000	0.013130	999.56	0.0010004	46.215	46.216	0.16587	4.1879	4.1940	1451.0	-0.023170	1269.2	0.58188	0.074075	liquid
12.000	0.014028	999.45	0.0010005	50.408	50.409	0.18061	4.1847	4.1925	1454.9	-0.023090	1234.1	0.58376	0.073929	liquid
13.000	0.014981	999.33	0.0010007	54.600	54.601	0.19528	4.1815	4.1912	1458.6	-0.023012	1200.5	0.58562	0.073782	liquid
14.000	0.015990	999.20	0.0010008	58.790	58.792	0.20990	4.1782	4.1899	1462.2	-0.022935	1168.4	0.58748	0.073634	liquid
15.000	0.017058	999.06	0.0010009	62.980	62.981	0.22446	4.1748	4.1888	1465.8	-0.022858	1137.6	0.58933	0.073486	liquid
16.000	0.018188	998.90	0.0010011	67.168	67.170	0.23897	4.1714	4.1878	1469.2	-0.022783	1108.1	0.59117	0.073337	liquid
17.000	0.019384	998.73	0.0010013	71.355	71.357	0.25343	4.1679	4.1868	1472.6	-0.022709	1079.9	0.59300	0.073188	liquid
18.000	0.020647	998.55	0.0010014	75.542	75.544	0.26783	4.1643	4.1859	1475.9	-0.022636	1052.7	0.59482	0.073038	liquid
19.000	0.021983	998.36	0.0010016	79.727	79.729	0.28218	4.1607	4.1851	1479.1	-0.022563	1026.7	0.59663	0.072887	liquid
20.000	0.023393	998.16	0.0010018	83.912	83.914	0.29648	4.1570	4.1844	1482.2	-0.022492	1001.6	0.59842	0.072736	liquid
21.000	0.024882	997.95	0.0010021	88.096	88.098	0.31073	4.1533	4.1837	1485.2	-0.022421	977.59	0.60019	0.072584	liquid
22.000	0.026453	997.73	0.0010023	92.279	92.282	0.32493	4.1495	4.1831	1488.2	-0.022352	954.46	0.60196	0.072432	liquid
23.000	0.028111	997.50	0.0010025	96.462	96.465	0.33908	4.1457	4.1825	1491.0	-0.022283	932.19	0.60370	0.072279	liquid
24.000	0.029858	997.25	0.0010028	100.64	100.65	0.35318	4.1418	4.1820	1493.8	-0.022214	910.76	0.60544	0.072126	liquid
25.000	0.031699	997.00	0.0010030	104.83	104.83	0.36722	4.1379	4.1816	1496.5	-0.022147	890.11	0.60715	0.071972	liquid
26.000	0.033639	996.74	0.0010033	109.01	109.01	0.38123	4.1339	4.1812	1499.2	-0.022080	870.20	0.60885	0.071818	liquid
27.000	0.035681	996.47	0.0010035	113.19	113.19	0.39518	4.1299	4.1809	1501.7	-0.022014	851.01	0.61053	0.071663	liquid
28.000	0.037831	996.19	0.0010038	117.37	117.37	0.40908	4.1258	4.1806	1504.2	-0.021948	832.49	0.61219	0.071507	liquid
29.000	0.040092	995.90	0.0010041	121.55	121.55	0.42294	4.1217	4.1803	1506.6	-0.021884	814.62	0.61383	0.071351	liquid
30.000	0.042470	995.61	0.0010044	125.73	125.73	0.43675	4.1175	4.1801	1509.0	-0.021819	797.36	0.61546	0.071194	liquid
31.000	0.044969	995.30	0.0010047	129.91	129.91	0.45052	4.1133	4.1799	1511.3	-0.021755	780.68	0.61706	0.071037	liquid
32.000	0.047596	994.99	0.0010050	134.09	134.09	0.46424	4.1091	4.1798	1513.5	-0.021692	764.56	0.61865	0.070879	liquid
33.000	0.050354	994.66	0.0010054	138.27	138.27	0.47792	4.1048	4.1796	1515.6	-0.021630	748.98	0.62021	0.070721	liquid
34.000	0.053251	994.33	0.0010057	142.45	142.45	0.49155	4.1005	4.1796	1517.7	-0.021567	733.90	0.62176	0.070562	liquid
35.000	0.056290	993.99	0.0010060	146.63	146.63	0.50513	4.0961	4.1795	1519.7	-0.021506	719.31	0.62328	0.070402	liquid

Reference States

Internal energy	U = 0 at 273.16 K for saturated liquid.
Entropy	S = 0 at 273.16 K for saturated liquid.

© 2011 by the U.S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America. All rights reserved.

Copyright for NIST Standard Reference Data is governed by the [Standard Reference Data Act](#).

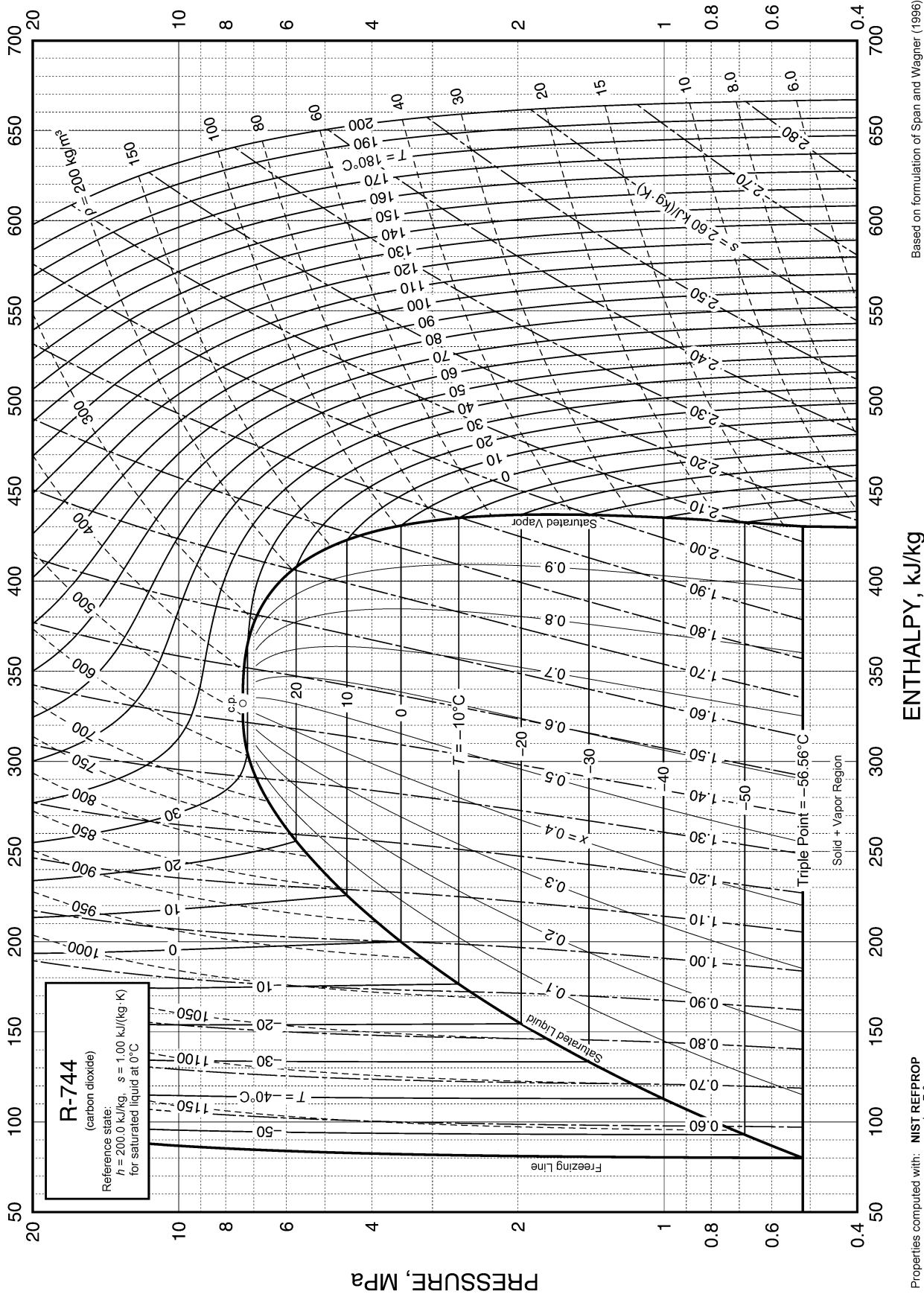


Fig. 18 Pressure-Enthalpy Diagram for Refrigerant 744 (Carbon Dioxide)

Properties computed with:
NIST REFPROP
version 7.0

Diagramme de l'air humide

Pression atmosphérique : 101 325 [Pa] Altitude : 0 [m]

