

# Examen THERMODYNAMIQUE MFEE 1A 2021-22

On veut alimenter en air comprimé à 16 bars absolus, une chaîne de fabrication robotisée. On veut calculer les caractéristiques du compresseur destiné à alimenter cette chaîne, sachant que l'air prélevé est à  $t_e = 18^\circ\text{C}$  et  $P_e = 1 \text{ Bar}$  et  $\psi_e = 100\%$ .

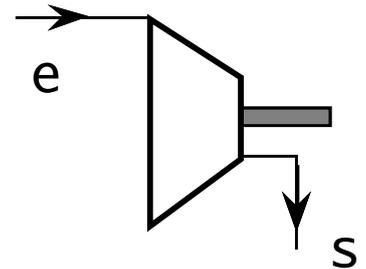
## I-COMPRESSION MONO-ÉTAGÉE D'AIR HUMIDE :

On suppose que le travail des forces de frottement est négligeable et que la compression est adiabatique.

On rappelle quelques caractéristiques pour l'eau :

$\mathcal{M}_w = 18 \text{ g.mol}^{-1}$ ,  $\gamma_w = 1.33$ ,  $L_0 = 2502 \text{ kJ.kg}^{-1}$  (à  $T = 0^\circ\text{C}$ ) et  $C_{pL} = 4,186 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  (pour l'eau liquide)

Pour l'air :  $\mathcal{M}_a = 29 \text{ g.mol}^{-1}$ ,  $\gamma_a = 1.4$ .



### 1. Caractéristiques de l'air humide en entrée de compresseur :

Déterminer la fraction molaire de vapeur d'eau en entrée du compresseur  $\phi_{v_e}$  en fonction de la pression de saturation  $P_{sat}$  et de la pression du mélange  $P_e$ . En déduire qu'à l'entrée du compresseur l'humidité absolue vérifie :

$$x_e = \frac{\mathcal{M}_w}{\mathcal{M}_a} \frac{P_{sat}(T_e)}{P_e - P_{sat}(T_e)}$$

Calculer les valeurs de  $\phi_{v_e}$  et  $x_e$

### 2. Densité de l'air humide :

Montrer que la densité de l'air humide s'exprime comme :

$$\rho = \rho_a \frac{1 + x}{1 + \frac{\mathcal{M}_a}{\mathcal{M}_w} x}$$

Calculer la densité de l'air humide en entrée de compresseur.

### 3. Débits massiques :

Sachant que la consommation totale d'air en entrée du compresseur est de

$\dot{V} = 650 \text{ L.s}^{-1}$ , calculer le débit massique total  $\dot{m}$  ainsi que les débits massiques d'air  $\dot{m}_a$  et de vapeur d'eau  $\dot{m}_v$ .

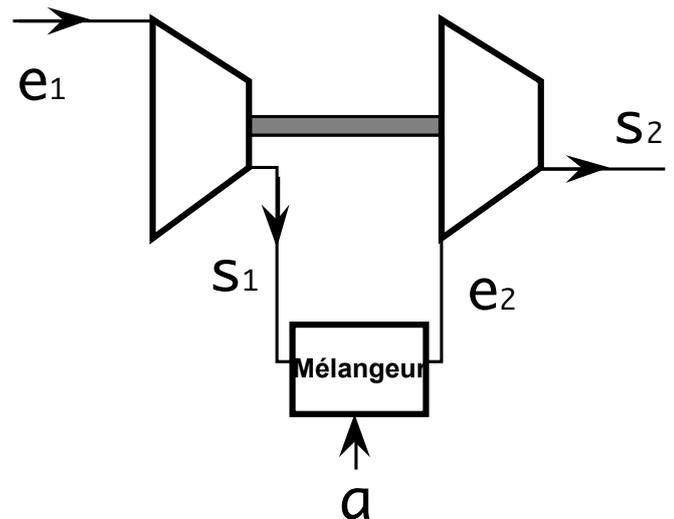
#### 4. Calcul de la compression :

Pour le mélange, comme  $\phi_e$  et  $x_e$  sont petits, on supposera que la valeur de l'exposant isentropique de l'air humide peut être assimilé à celui de l'air sec. Calculer la température de sortie  $T_s$  et la puissance de compression pour une compression idéale.

Déterminer le degré hygrométrique  $\psi_s$  en sortie de compression.

## II- DIMINUTION DE LA PUISSANCE PAR FRACTIONNEMENT ET INJECTION D'EAU

On fractionne la compression dans deux corps de compresseurs ayant le même taux de compression afin d'assurer une pression de 16 Bar en sortie d'installation (en  $s_2$ ). On cherche à obtenir une réduction de puissance en abaissant la température de sortie du premier compresseur. Pour se faire, on dispose d'un mélangeur dans lequel on introduit de l'eau à  $t_L = 18^\circ\text{C}$ . Pourvu que l'air en  $s_1$ , ne soit pas saturé en vapeur d'eau, l'eau injectée va se vaporiser en prélevant à l'air l'énergie nécessaire au changement de phase. On supposera par la suite qu'on injecte une quantité d'eau telle que l'air soit saturé en sortie du mélangeur.



#### 5. Condition en sortie du premier compresseur :

Quelle est le taux de compression de chacun des compresseurs?

Quels sont la température de l'air  $T_{s_1}$ , le degré hygrométrique  $\psi_{s_1}$  en sortie du premier compresseur? Quelle est la puissance nécessaire à cette première compression (supposée idéale)?

#### 6. Bilan de masse et d'enthalpie dans le mélangeur :

Pour un état de référence des enthalpies à  $0^\circ\text{C}$  l'air l'air sec et l'eau liquide, déterminer l'enthalpie de l'air humide par unité de masse d'air sec.

En appliquant un bilan de masse et d'énergie au mélangeur montrer que :

$$C_{p_a} t_{e_2} + x_{e_2} (L_0 + C_{p_v} t_{e_2} - C_{p_L} t_L) = C_{p_a} t_{s_1} + x_{s_1} (L_0 + C_{p_v} t_{s_1} - C_{p_L} t_L)$$

où  $t$  est la température exprimée en  $^\circ\text{C}$ .

#### 7. Puissance de compression :

En exprimant  $x_{e_2}$  en fonction de la pression de saturation, écrire une équation permettant de déterminer  $t_{e_2}$ . Montrer que  $t_{e_2} = 68,5^\circ\text{C}$  donne une solution approchée de cette équation.

Déterminer le débit d'eau injectée dans le refroidisseur.

Déterminer ensuite la puissance nécessaire à la compression (supposée idéale) du deuxième étage et comparer la puissance totale à celle du système avec une unique compression.

## A.1.1 Vapeur d'eau saturée : table de la température

$T$ °C	$P$ kPa	volume $v$ , m <sup>3</sup> /kg		énergie $e$ , kJ/kg			enthalpie $h$ , kJ/kg			entropie $s$ , kJ/kg/K		
		l.sat.	v.sat.	l. sat.	évap.	v.sat.	l. sat.	évap.	v.sat.	l. sat.	évap.	v.sat.
0.01	0.6113	0.001000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	6.8004	7.7553
7.5	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
	MPa											
100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698
200	1.5538	0.001157	0.12736	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001164	0.11521	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001173	0.10441	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001181	0.09479	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001190	0.08619	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001199	0.07849	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001209	0.07158	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001219	0.06537	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001229	0.05976	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001240	0.05471	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001251	0.05013	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001263	0.04598	1104.28	1496.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001276	0.04221	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001289	0.03877	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001302	0.03564	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001317	0.03279	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001332	0.03017	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001348	0.02777	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001366	0.02557	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001384	0.02354	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001404	0.02167	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001425	0.019948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310	9.856	0.001447	0.018350	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001472	0.016867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001499	0.015488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001561	0.012996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001638	0.010797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001740	0.008813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001893	0.006945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002213	0.004925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	0.6865	4.7971
374.14	22.09	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298