

Utilisation de la vapeur

BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 1985

ETUDE D'UN CYCLE DE RANKINE

On considère le cycle suivant décrit par une masse d'eau égale à $m = 1$ kg.

De la vapeur saturante sèche, à la pression $p_1 = 15$ bar est introduite dans une turbine où elle se détend isentropiquement jusqu'à une pression $p_2 = 0,13$ bar. Cette évolution sera notée (A B). L'eau est alors évacuée dans un condenseur où la condensation s'achève à la pression p_2 (évolution B C).

Une pompe élève ensuite la pression de l'eau de façon isentropique de p_2 à p_1 (évolution C D) puis l'eau est chauffée et vaporisée dans la chaudière à pression constante p_1 (évolution D E A).

1. Dans un diagramme (p, V), représenter le cycle A B C D E A, sur lequel on fera figurer la courbe de saturation de l'eau (on ne fera aucun calcul).
2. A l'aide du diagramme de MOLLIER ci-joint, calculer la chaleur latente de vaporisation de l'eau L_{01} à la température $\theta_1 = 200$ °C.
3. Déterminer la quantité de chaleur Q_1 reçue par la masse d'eau m dans la chaudière.

Données numériques pour l'eau

Capacité thermique-massique de l'eau liquide entre 100 °C et 200°C : $c = 4,18 \times 10^3$ J \cdot kg⁻¹ \cdot K⁻¹

4. A l'aide du diagramme de MOLLIER, calculer la chaleur latente de vaporisation de l'eau L_{02} à la température $\theta_2 = 50$ °C.
5. Lire sur le diagramme de MOLLIER le taux de vapeur à la sortie de la turbine.
6. Calculer la quantité de chaleur Q_2 fournie par la masse d'eau m au condenseur.
7. En appliquant le premier Principe de la thermodynamique calculer le rendement de ce cycle moteur.
8. Le fluide réfrigérant alimentant le condenseur est l'eau d'une rivière qui est captée à une température initiale $\theta_1 = 10$ °C et qui est rejetée à une température finale $\theta_f = 15$ °C (figure 1). Le mélange liquide-vapeur entre dans le condenseur à la température $\theta_2 = 50$ °C avec un taux de vapeur $x = 0,78$ et en ressort entièrement liquide (à 50 °C). Pour une masse $m = 1$ kg d'eau du cycle Rankine, calculer la masse M d'eau de rivière qui traverse le condenseur.
9. La chaudière produit 3600 kg de vapeur par heure. Le coefficient global d'échange entre les deux fluides est égal à $K = 1700$ W \cdot m⁻² \cdot K⁻¹. Soit D le diamètre de la conduite de fluide réfrigérant.
 - 9.1. $y = 0$ correspond à l'entrée de l'échangeur et θ est la température du fluide réfrigérant à la distance y de l'entrée de l'échangeur. Etablir la loi $\theta = f(y)$.
 - 9.2. En déduire la longueur de l'échangeur sachant que $D = 1$ m.

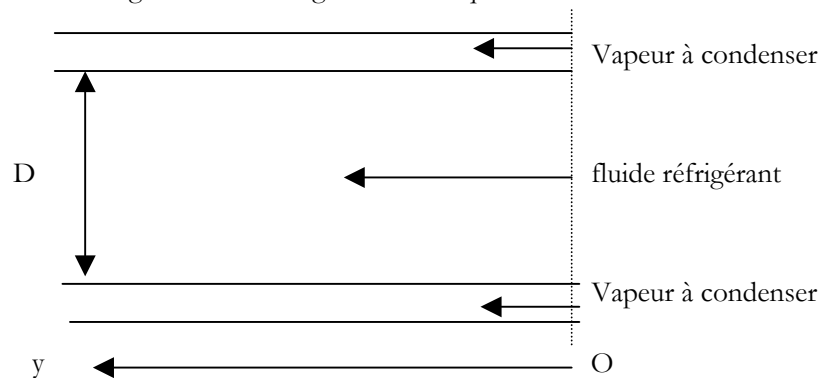
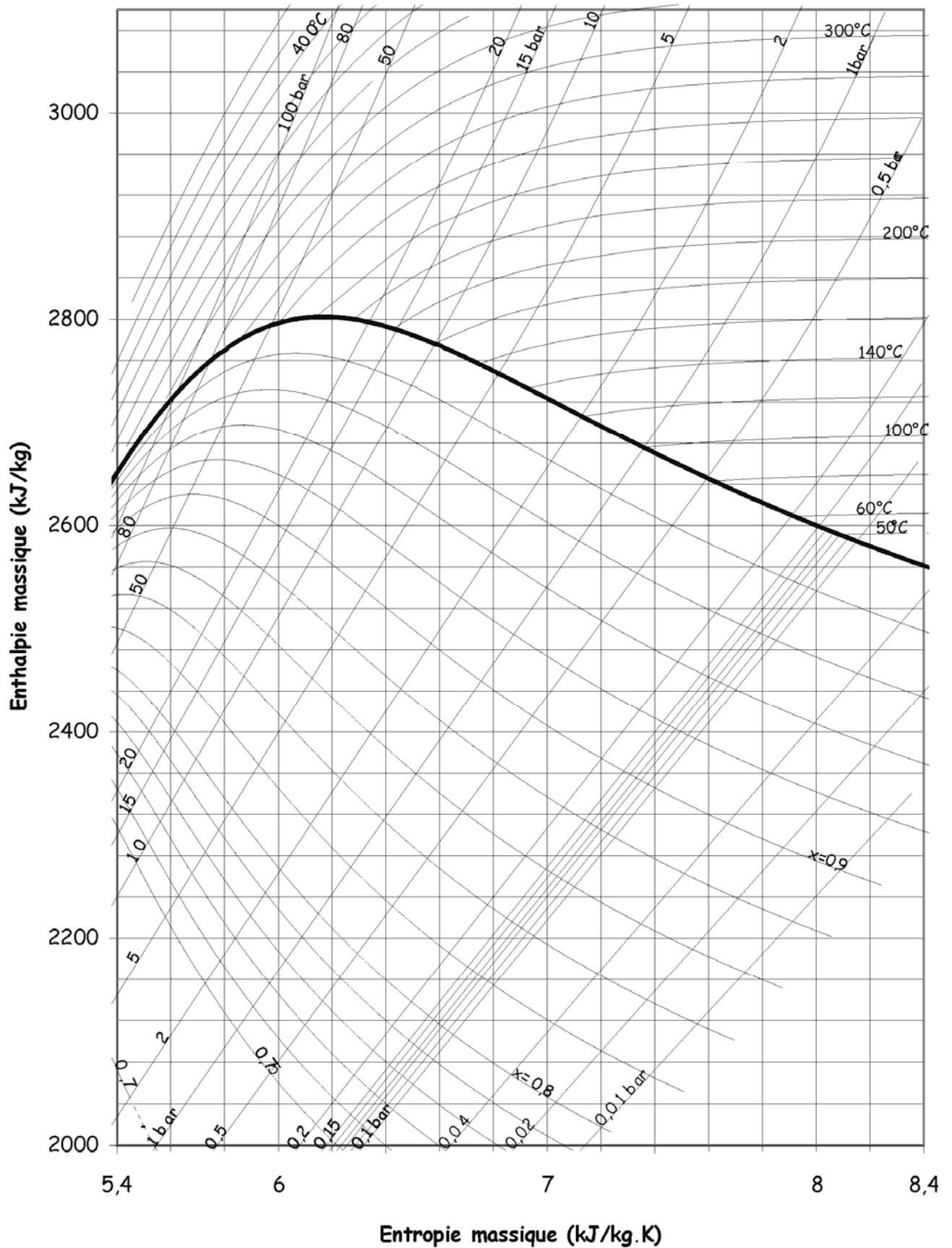


Figure 1.

Document joint :

Diagramme = Document réponse fourni en 2 exemplaires dont un seul, complété, sera rendu avec la copie en fin d'épreuve.

Diagramme de Mollier de l'eau



BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 1987

On se propose d'étudier différentes versions d'une installation thermique motrice.

PARTIE A

La machine fonctionne suivant un cycle de Rankine. Le générateur de vapeur produit de la vapeur saturée qui traverse la turbine où elle se détend avant de se condenser, puis l'eau condensée retourne à la chaudière à travers la pompe alimentaire [schéma de l'installation : document II.1.a].

Les différentes étapes du cycle sont les suivantes :

A → B → C échauffement isobare de 30°C à 295°C à $p_1 = 80$ bars (pression absolue) puis vaporisation à 295°C,

C → D détente adiabatique réversible de $p_1 = 80$ bars à $p_2 = 0,04$ bar,

D → E fin de condensation à $p_2 = 0,04$ bar,

E → A compression adiabatique réversible de l'eau de $p_2 = 0,04$ bar à $p_1 = 80$ bars,

1. Donner l'allure du cycle sur un diagramme (p, V) faisant apparaître la courbe de saturation de l'eau.
2. Représenter le cycle sur le diagramme entropique fourni (document II,2) Expliquer comment on peut sur un tel diagramme évaluer le rendement du cycle (indiquer le principe sans chercher à effectuer de calcul).
3. Déterminer l'enthalpie massique du fluide aux points A, B, C, D.
4. Faire figurer sur le diagramme de Mollier (document II,4) l'évolution CD, En déduire le titre x de la vapeur d'eau à la sortie de la turbine.
5. Calculer le rendement théorique du cycle : η .
6. En admettant que le générateur de vapeur fournisse 500 tonnes de vapeur à l'heure, quelle serait la puissance théorique correspondante ?
7. Sachant que l'élévation de température de l'eau de circulation est de 8°C, calculer le débit massique de l'eau de circulation (on prendra : chaleur massique de l'eau : $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).
8. Si l'on sait que dans l'échangeur une surface tubulaire de 1 m^2 permet la condensation de 40 kg de vapeur à l'heure, quelle doit être la surface d'échange nécessaire ?

PARTIE B

La machine fonctionne maintenant suivant un cycle de Hirn.

L'eau, une fois vaporisée dans les conditions précédentes subit une surchauffe isobare à 80 bar jusqu'à 500°C, Le reste du cycle demeure inchangé [schéma de l'installation document II.1.b].

On notera C → C' la Surchauffe

C' → D' la détente dans la turbine.

1. Représenter sur le diagramme entropique déjà utilisé, d'une couleur différente, le nouveau cycle décrit.
2. Donner l'enthalpie massique aux points C' et D', Noter sur le diagramme de Mollier la détente CD. Quel est maintenant le titre x' de la vapeur à la sortie de la turbine ?
3. Calculer le nouveau rendement η' du cycle.
4. Quelle est l'augmentation relative du rendement obtenue grâce à la surchauffe ?

PARTIE C

Le cycle comporte maintenant un soutirage : une partie de la vapeur est prélevée en cours de détente dans la turbine. Elle servira à réchauffer l'eau en provenance du condenseur. Elle va donc se refroidir (opération de désurchauffe), puis se condenser. Elle sera ensuite réinjectée dans le circuit grâce à la pompe de reprise, [schéma de l'installation : document II 1 c].

Les données relatives au cycle précédent (partie B) restent inchangées. Le soutirage porte sur 30% de la masse de vapeur admise dans la turbine et se produit à $p = 50$ bar.

On notera E → F la désurchauffe isobare de la vapeur

F → G sa condensation.

1. Faire apparaître les phénomènes sur le diagramme entropique. Expliquer clairement l'évolution subie par la vapeur soutirée.

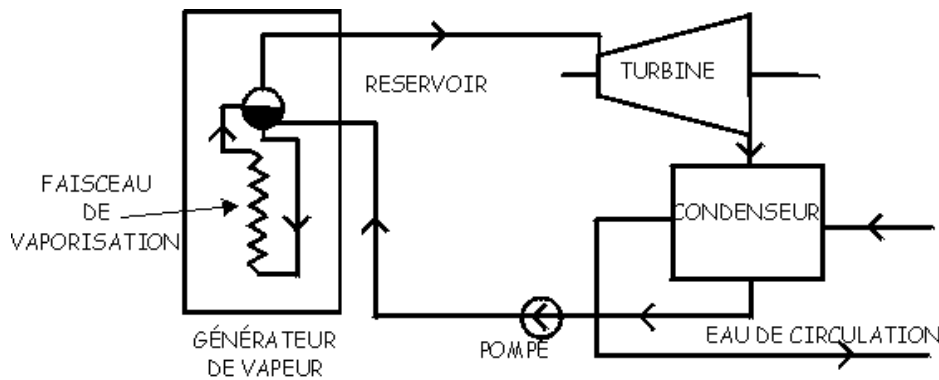
2. Déterminer les enthalpies massiques du fluide aux points E, G.
3. Calculer la quantité de chaleur cédée au niveau du réchauffeur par 0,3 kg de vapeur soutirée et donc reçue par 0,7 kg d'eau provenant du condenseur.
4. En déduire l'enthalpie h_R de l'eau à la sortie du réchauffeur, l'enthalpie h_K et la température T_K du mélange qui retourne au générateur de vapeur.
5. Calculer le rendement théorique du cycle η'' . Conclusions.

Documents joints

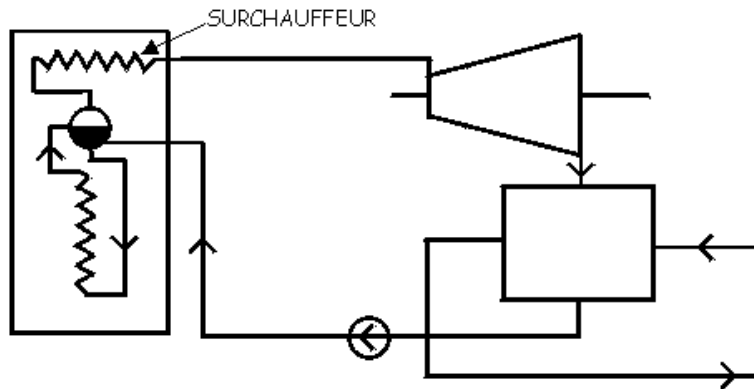
Doc, I1 - I2 - II1 - II2 - II3 - II4

(Les documents I2 - II,2 - II,4 constituent des documents réponses et sont fournis en double exemplaire dont un seul de chaque, complété, est à remettre par le candidat, avec la copie, en fin d'épreuve)

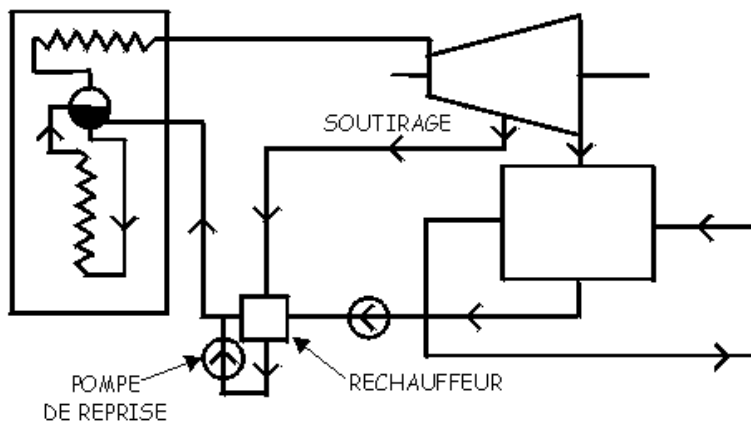
Document II.1



II a



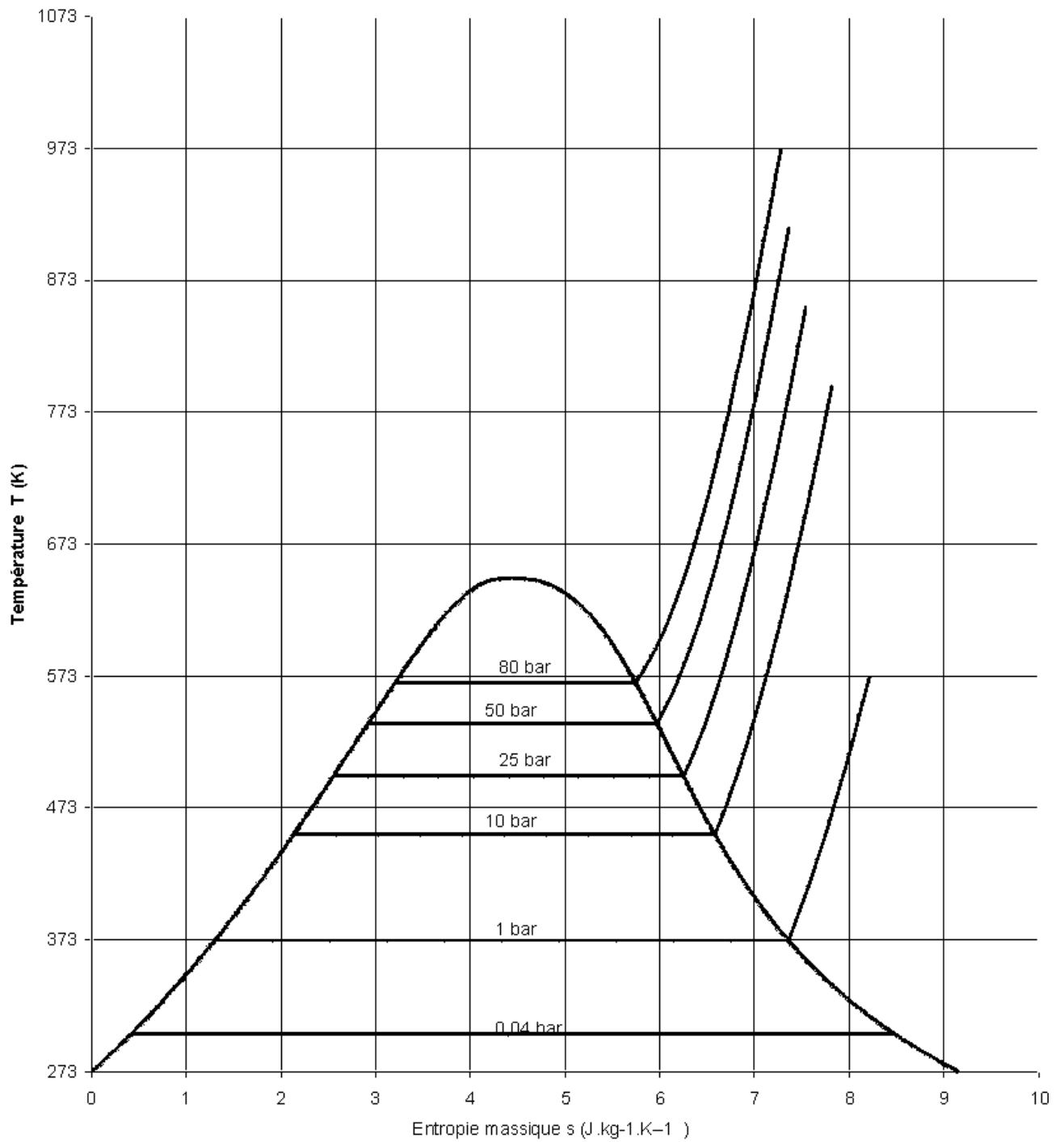
II b



II.c

Document II.2

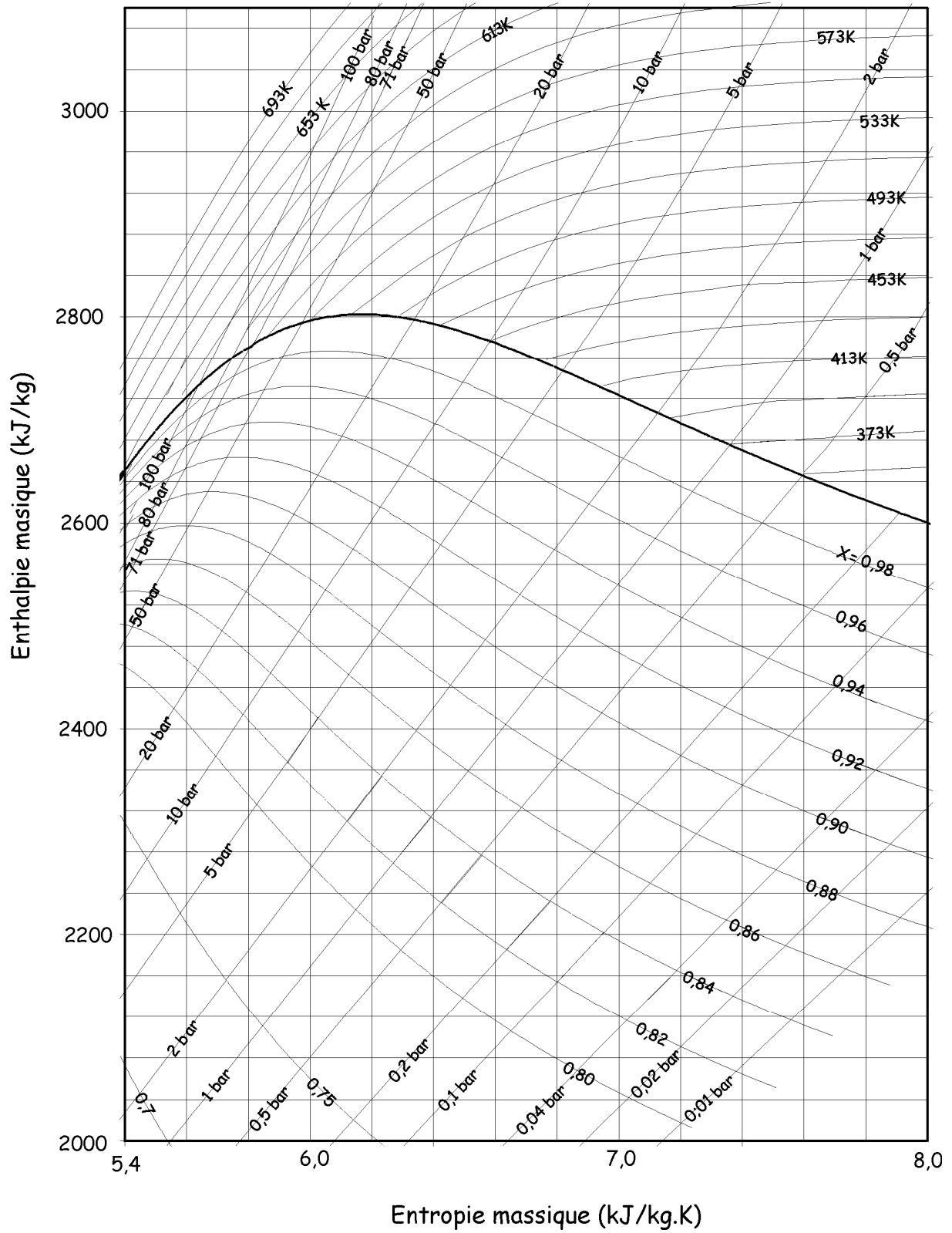
Diagramme entropique de l'eau



Document II.3
Propriétés de l'eau (Région saturée)

Température °C	Pression bar	Volume massique		Enthalpie massique		Entropie massique	
		liquide m ³ /kg	vapeur m ³ /kg	liquide kJ/kg	vapeur kJ/kg	liquide kJ/K·kg	vapeur kJ/K·kg
0,01	0,006106	0,0010002	206,3	0	2501	0	9,1544
5	0,005719	0,0010001	147,2	21,05	2510	0,0762	9,0241
10	0,012277	0,0010004	106,42	42,04	2519	0,161	8,8914
15	0,017041	0,001001	77,97	62,97	2528	0,2244	8,7806
20	0,02337	0,0010018	57,84	83,9	2637	0,2964	8,6665
25	0,03168	0,001003	43,4	104,81	2547	0,3672	8,557
30	0,04241	0,0010044	32,93	125,71	2556	0,4366	8,4523
35	0,05622	0,0010061	25,24	146,6	2565	0,5049	8,3519
40	0,07375	0,0010079	19,55	167,5	2574	0,5723	8,2559
45	0,09584	0,0010099	15,28	188,4	2582	0,6384	8,1638
50	0,12335	0,0010121	12,04	209,3	2592	0,7038	8,0753
55	0,1574	0,0010145	9,578	230,2	2600	0,7679	7,9901
60	0,19917	0,0010171	7,678	251,1	2609	0,8311	7,9084
65	0,2501	0,0010199	6,201	272,1	2617	0,8934	7,8297
70	0,3117	0,0010228	5,045	293	2626	0,9549	7,7544
75	0,3855	0,0010258	4,133	314	2635	1,0157	7,6815
80	0,4736	0,001029	3,408	334,9	2643	1,0753	7,6116
85	0,5781	0,0010324	2,828	355,9	2651	1,1342	7,5438
90	0,7011	0,0010359	2,361	377	2659	1,1925	7,4787
95	0,8451	0,0010396	1,982	398	2668	1,2502	7,4155
100	1,0131	0,0010435	1,673	419,1	2676	1,3071	7,3547
105	1,2079	0,0010474	1,419	440,2	2683	1,3132	7,2959
110	1,4326	0,0010515	1,21	461,3	2691	1,4184	7,2387
115	1,6905	0,0010559	1,036	482,5	2696	1,4733	7,1832
120	1,9654	0,0010803	0,8917	503,7	2706	1,5277	7,1298
125	2,3208	0,0010649	0,7704	525	2713	1,5814	7,0777
130	2,7011	0,0010697	0,6683	546,3	2721	1,6354	7,0272
135	3,13	0,0010747	0,582	567,5	2727	1,6569	6,9781
140	3,614	0,0010798	0,5087	589	2734	1,7392	6,9304
145	4,155	0,0010651	0,4481	610,5	2740	1,7907	6,8839
150	4,78	0,0010906	0,3926	632,2	2746	1,8418	6,8383
155	5,433	0,0010962	0,3466	653,9	2753	1,8924	6,794
160	6,18	0,0011021	0,3068	675,6	2758	1,9427	6,7508
165	7,008	0,0011061	0,2725	697,3	2763	1,9924	6,7081
170	7,92	0,0011144	0,2426	719,2	2769	2,0417	6,6036
175	8,925	0,0011208	0,2166	741,1	2773	2,0909	6,6256
180	10,087	0,0011275	0,1939	763,1	2778	2,1395	6,5858
185	11,234	0,0011344	0,1739	785,2	2782	2,1876	6,5465
190	12,553	0,0011415	0,1564	807,5	2786	2,2357	6,5074
195	13,969	0,0011489	0,1409	829,9	2790	2,2834	6,4694
200	15,551	0,0011565	0,1272	852,4	2793	2,3308	6,4318
205	17,245	0,0011644	0,1151	875	2796	2,3777	6,3945
210	19,66	0,0011726	0,1043	897,7	2796	2,4246	6,3577
215	21,062	0,0011812	0,09465	920,7	2800	2,4751	6,3212
220	23,201	0,00119	0,08606	943,7	2802	2,5179	6,2849
225	25,504	0,0011992	0,07837	966,9	2802	2,564	6,2488
230	27,979	0,0012087	0,07147	990,4	2803	2,6101	6,2133
235	30,635	0,0012187	0,06527	1013,9	2804	2,6561	6,178
240	33,48	0,0012291	0,05967	1037,5	2803	2,7021	6,1425
245	36,524	0,0012399	0,05462	1061,6	2803	2,7478	6,1073
250	39,776	0,0012512	0,05006	1085,7	2801	2,7934	6,0721
255	43,25	0,0012631	0,04591	1110,2	2799	2,8394	6,0366
260	46,94	0,0012755	0,04215	1135,1	2796	2,8851	6,0013
265	50,87	0,0012886	0,03872	1160,2	2794	2,9307	5,9657
270	55,05	0,0013023	0,0356	1185,3	2790	2,9764	5,9297
275	59,49	0,0013168	0,03274	1210,7	2785	3,0223	5,8938
280	64,19	0,0013321	0,03013	1236,9	2780	3,0681	5,8573
285	69,18	0,0013483	0,02773	1263,1	2773	3,1146	5,8205
290	74,45	0,0013655	0,02554	1290	2766	3,1611	5,7827
295	80,02	0,0013839	0,02351	1317,2	2758	3,2079	5,7443
300	85,92	0,0014036	0,02164	1344,9	2749	3,2548	5,7049
305	92,14	0,001425	0,01992	1373,1	2739	3,3026	5,6647
310	98,7	0,001447	0,01832	1402,1	2727	3,3508	5,6233
315	105,61	0,001472	0,01683	1431,7	2714	3,3996	5,5802
320	112,9	0,001499	0,01545	1462,1	2700	3,4495	5,5353
325	120,57	0,001529	0,01417	1493,6	2684	3,5002	5,4919
330	128,65	0,001562	0,01297	1526,1	2666	3,5522	5,4412
335	137,14	0,001599	0,01184	1559,8	2646	3,6056	5,3905
340	146,08	0,001639	0,01078	1594,7	2622	3,6605	5,3361
345	155,48	0,001686	0,009771	1632	2595	3,7184	5,2769
350	165,37	0,001741	0,008803	1671	2565	3,7786	5,2117
355	175,77	0,001807	0,007869	1714	2527	3,8439	5,1385
360	186,74	0,001894	0,006943	1762	2481	3,9162	5,053
365	198,3	0,00202	0,00599	1817	2421	4,0009	4,9463
370	210,53	0,00222	0,00493	1893	2331	4,1137	4,7951
374,15	221,297	0,00326	0,00326	2100	2100	4,4296	4,4296

Document II.4 Diagramme de Mollier de l'eau



BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 1992

Ce problème décrit de façon simplifiée le fonctionnement de quelques parties d'une centrale électronucléaire à eau pressurisée (figure 1).

Les parties I, II, III sont indépendantes les unes des autres et peuvent être traitées dans un ordre quelconque.

I - Etude du circuit primaire

A l'entrée et à la sortie de la cuve du réacteur, ainsi que dans le pressuriseur, la pression est de 155 bar. On relève respectivement à l'entrée et à la sortie de la cuve les températures $t_3 = 284^\circ\text{C}$ et $t_4 = 321^\circ\text{C}$.

1. On considère le diagramme (p, t) (Annexe 1 qui est à rendre avec la copie) où

- p_s est la pression de vapeur saturante de l'eau en bars
- t est la température de l'eau en degrés Celsius.

1.1. Indiquer sur ce diagramme le domaine de l'eau liquide et celui de l'eau vapeur en justifiant.

1.2. Placer, en justifiant, les points 3 et 4 représentant respectivement les états de l'eau à l'entrée et à la sortie de la cuve.

1.3. Le pressuriseur contient un mélange d'eau liquide et d'eau vapeur. Placer, en justifiant, le point M représentant l'état de l'eau du pressuriseur sur le même diagramme. En déduire la température qui y règne.

2. Dans les conditions où elle circule dans la cuve, la capacité thermique massique de l'eau est $c' = 5,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Calculer la variation d'enthalpie massique de l'eau entre l'entrée et la sortie de la cuve du réacteur.

3. Calculer la valeur du débit massique D_m d'eau nécessaire dans le réacteur pour évacuer une puissance thermique P_1 de 2800 MW fournie par la fission.

II - Détente de la vapeur dans la turbine.

1. À l'admission dans la turbine, la vapeur est saturante - sèche. Sa pression est $p_5 = 50 \text{ bar}$, sa température t_5 .

On suppose que la détente dans la turbine se fait de façon isentropique. A la sortie, la pression p_6 vaut 10 bars et la température est t_6 .

Placer sur le diagramme entropique de l'eau (annexe 2 à rendre avec la copie) les points 5 et 6 en justifiant leurs positions.

Utiliser le diagramme pour déterminer

- les valeurs de t_5 et t_6
- l'état de l'eau à la sortie de la turbine.

2. On veut déterminer la température $t_{5'}$ jusqu'à laquelle il faudrait surchauffer la vapeur, sous la pression p_5 , pour que, après détente isentropique dans la turbine de la pression p_5 à la pression p_6 , cette vapeur soit saturante sèche (état 6').

2.1. Placer sur le diagramme, en justifiant, les points 5' et 6'. En déduire la valeur de la température $t_{5'}$.

2.2. En considérant que la vapeur entre les états 5' et 6' se comporte comme un gaz parfait pour lequel $\gamma = 1,3$, calculer la valeur de $t_{5'}$. Comparer avec la valeur lue sur le diagramme.

III - Etude générale du rendement.

La centrale (sans l'alternateur) peut être considérée comme un moteur thermique où l'eau décrit un cycle entre deux sources (figure 2)

La source chaude Σ_1 qui est le cœur du réacteur, de température constante $t_1 = 325^\circ\text{C}$.

La source froide Σ_2 qui est un réfrigérant de température constante $t_2 = 15^\circ\text{C}$.

L'eau échange un travail total \mathcal{W} avec les parties mobiles du système.

Selon la convention habituelle, les énergies sont comptées positivement quand le système considéré les reçoit.

1. Préciser les signes des chaleurs Q_1 et Q_2 que l'eau échange avec les sources et le signe du travail \mathcal{W} .

2. Donner la définition du rendement thermodynamique r du cycle en fonction de \mathcal{W} et de l'une des chaleurs et trouver son expression, en fonction de Q_1 et Q_2 .

3. En fonctionnement réel, le rendement vaut $r = 0,33$. Le travail total échangé avec les parties mobiles pendant chaque seconde est égal, en valeur absolue, à la puissance électrique de la centrale, soit 925 MW.

3.1. Calculer la valeur de la puissance thermique P_1 échangée par le fluide avec la source chaude, cœur du réacteur.

3.2. Calculer la valeur de la puissance thermique P_2 échangée par le fluide avec la source froide.

Le réfrigérant est l'eau d'un fleuve. Sa température n'est qu'en moyenne égale à 15°C . Calculer la valeur du débit massique D_m dans le circuit de refroidissement quand la température de l'eau du fleuve augmente de 10°C entre l'entrée et la sortie.

On donne : capacité thermique massique de l'eau au voisinage de 15°C : $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

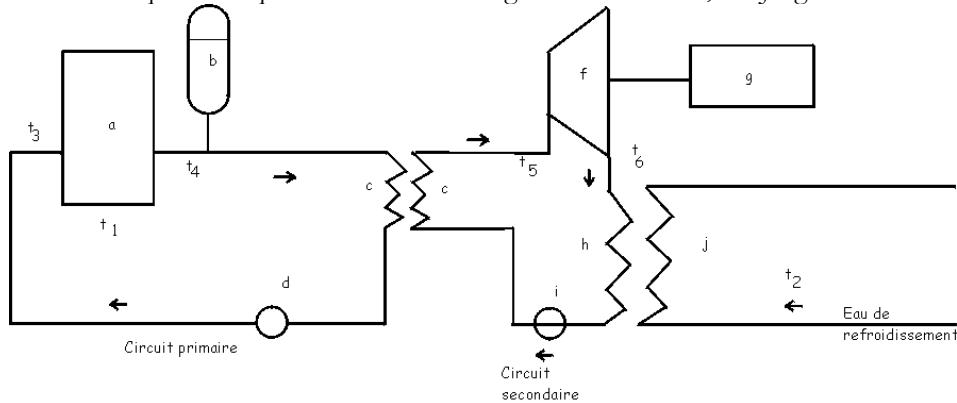


Figure 1

Circuit primaire

- a : cuve du réacteur = source chaude Σ_1
- b : pressuriseur
- c : générateur de vapeur (branche du circuit primaire)
- d : motopompe primaire de circulation d'eau liquide

Circuit secondaire :

- e : générateur de vapeur (branche du circuit secondaire)
- f : turbine
- g : alternateur
- h : condenseur
- i : motopompe secondaire de circulation d'eau liquide
- j : circuit du réfrigérant : source froide Σ_2

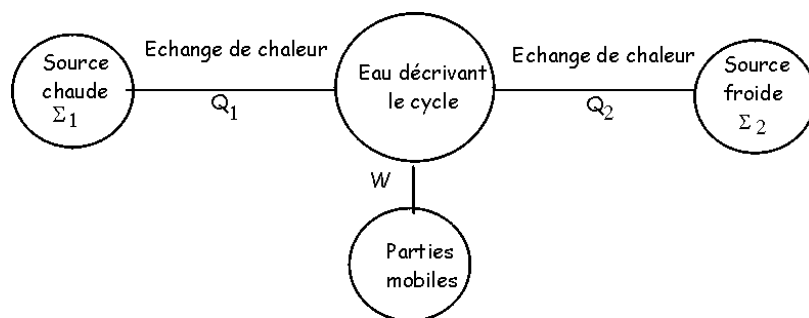
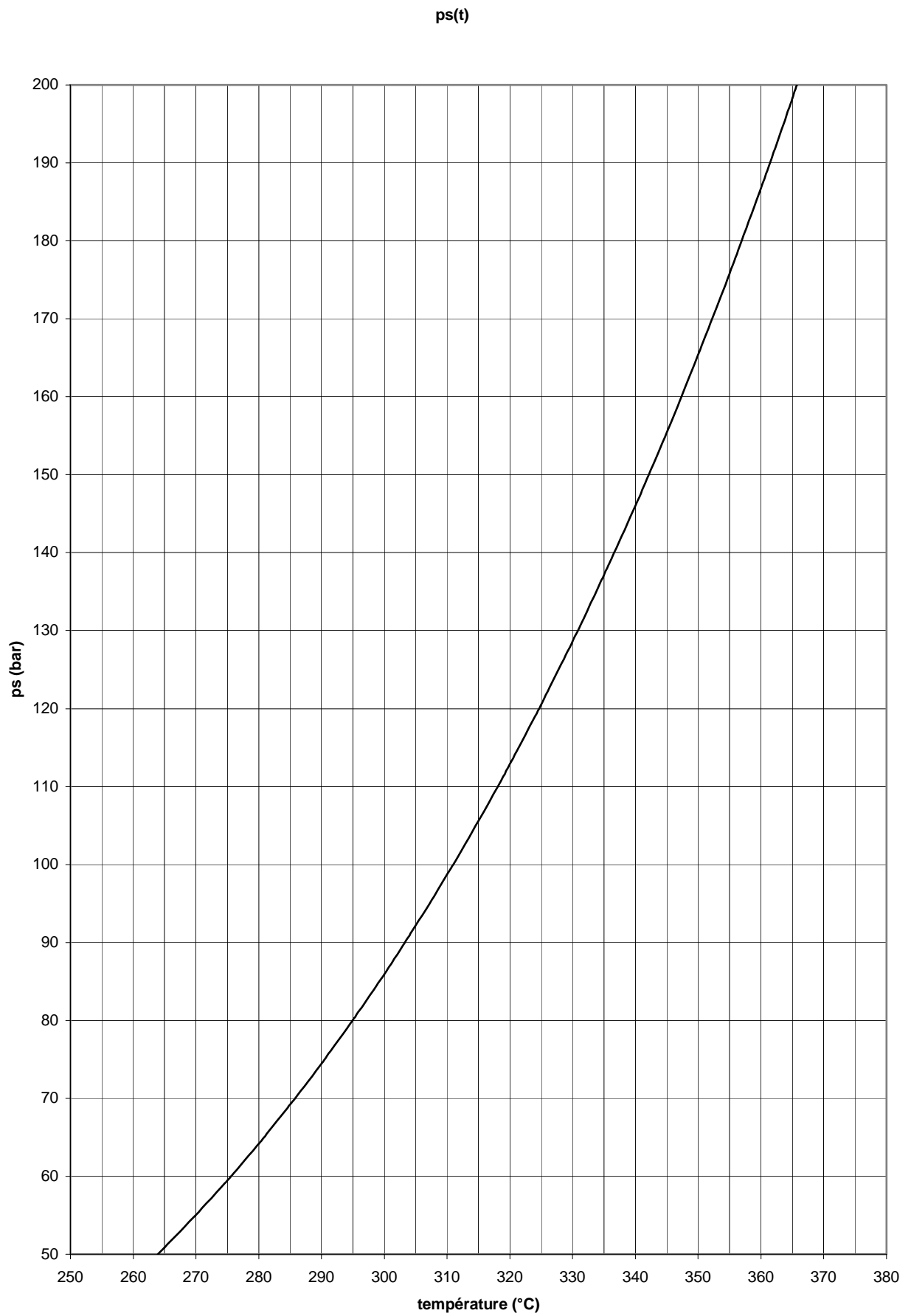
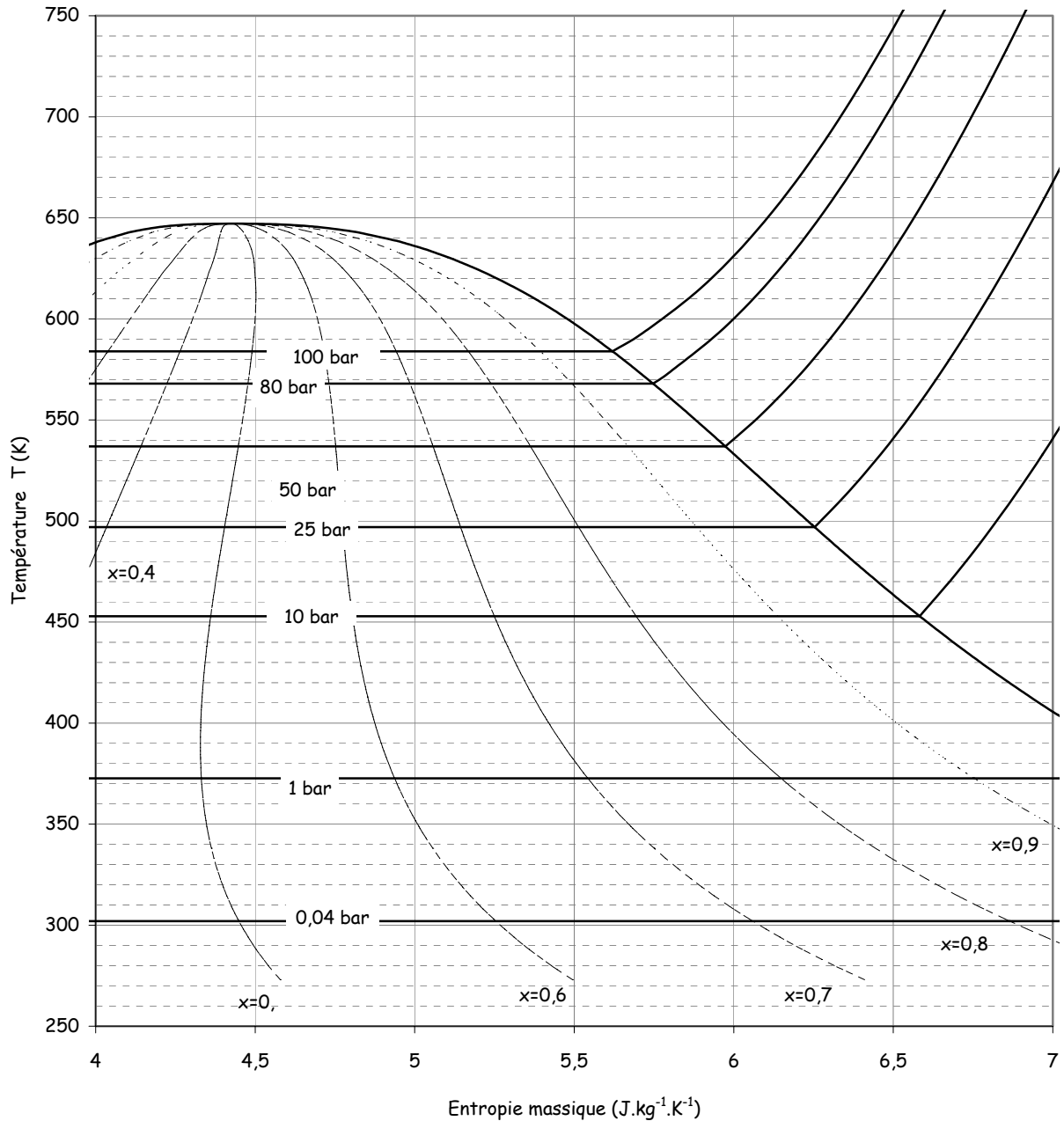


Figure 2
Annexe 1



Annexe 2

Diagramme entropique de l'eau

**BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 1999****Etude du cycle de l'eau dans une centrale thermique***PARTIE I : Cycle sans surchauffe*

Dans une centrale thermique, le générateur de vapeur produit de la vapeur saturée qui traverse une turbine où elle se détend avant de se condenser, l'eau condensée retourne au générateur de vapeur à travers une pompe.

L'ensemble est schématisé *figure 1*.

Les différentes étapes du cycle de l'eau sont les suivantes :

- 1 → 2 Détente isentropique de l'eau de la pression $p_1 = 50$ bar à la pression $p_2 = 0,2$ bar ; l'eau passant de l'état 1 (vapeur saturante sèche) à l'état 2 (vapeur humide : température T_2 , titre de vapeur x).
- 2 → 3 Fin de condensation à la pression $p_2 = 0,2$ bar.
- 3 → 4 Compression isentropique de l'eau liquide de la pression $p_2 = 0,2$ bar à la pression $p_1 = 50$ bar.
- 4 → 5 → 1 Echauffement isobare de l'eau liquide de la température T_2 à la température T_1 , à la pression $p_1 = 50$ bar puis vaporisation à la température T_1 . Le point 5 étant l'état intermédiaire.

On donne :

- le diagramme de Mollier $h = f(s)$;
 - les enthalpies massiques de l'eau liquide dans les états 3 et 4 : $h_3 = h_4 = 250$ kJ · kg⁻¹ ;
 - dans tout le problème, le travail effectué par la pompe sera considéré comme négligeable .
1. Placer, en justifiant votre réponse, les points 1 et 2 dans le diagramme de Mollier; en déduire le titre x de la vapeur au point 2 et les enthalpies massiques de l'eau h_1 et h_2 relatives aux états 1 et 2. Calculer le travail massique w échangé lors de la détente 1 → 2. (Justifier).
 2. Exprimer puis calculer la quantité de chaleur massique q échangée par l'eau lors de l'échauffement isobare à la pression p_1 et de la vaporisation dans le générateur de vapeur (étape 4 → 5 → 1)
 3. Déterminer le rendement thermodynamique η du cycle.
 4. Le générateur de vapeur produisant la vapeur avec le débit $D_m = 400$ t · h⁻¹ (tonnes par heure), calculer la puissance fournie à la turbine.

PARTIE II : Cycle avec surchauffes

Le schéma explicatif correspondant est représenté figure 2

Afin d'éviter un début de condensation dans la turbine, on surchauffe la vapeur saturante en deux étapes :

- chauffage isobare à p_1 (1 → 1') suivi d'une détente isentropique (1' → 2') l'amenant à l'état de vapeur saturante sèche à la pression $p' = 5$ bar.
 - chauffage isobare à p' (2' → 1'') suivi d'une détente isentropique (1'' → 2'') l'amenant à l'état de vapeur saturante sèche à la pression $p_2 = 0,2$ bar.
1. Placer, en justifiant votre réponse, les points 2', 1', 2'', 1'' sur le diagramme
 2.
 - 2.1. Relever les valeurs de l'enthalpie massique aux quatre points 1', 2', 1'' et 2''.
 - 2.2. Calculer la nouvelle quantité de chaleur massique q' totale échangée au niveau du générateur de vapeur et des surchauffeurs.
 - 2.3. Calculer le nouveau travail massique total w' échangé au niveau des deux turbines.
 3. Déterminer le rendement thermodynamique η' du nouveau cycle et l'augmentation relative de la puissance de l'installation, le débit de vapeur restant inchangé.

FIGURE 1

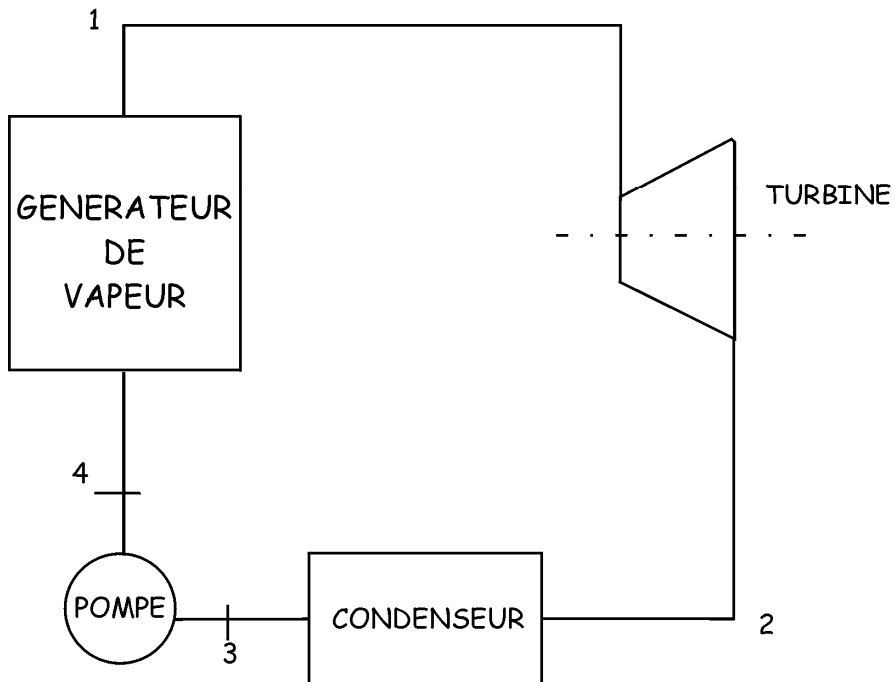


FIGURE 2

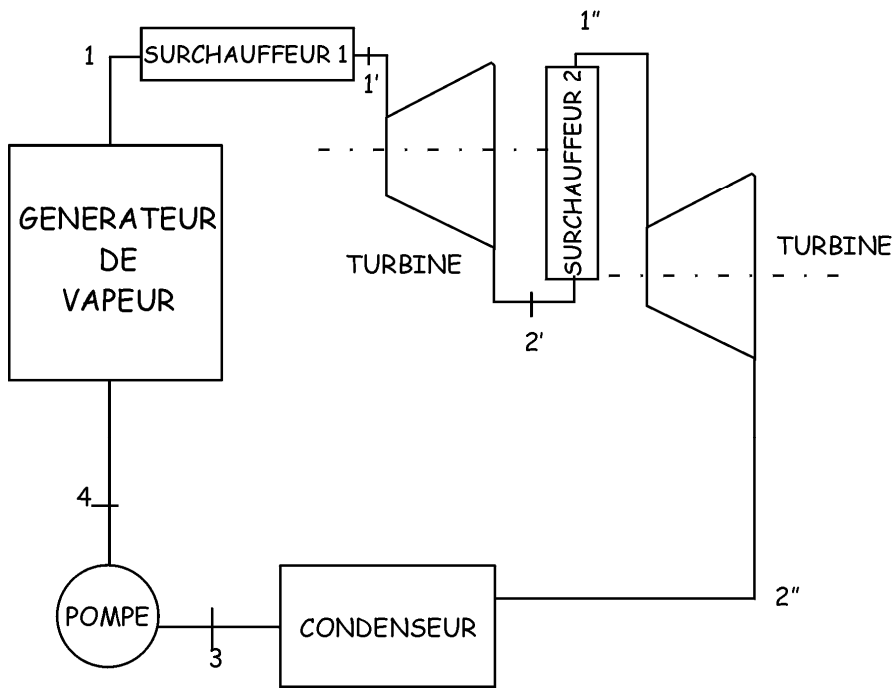
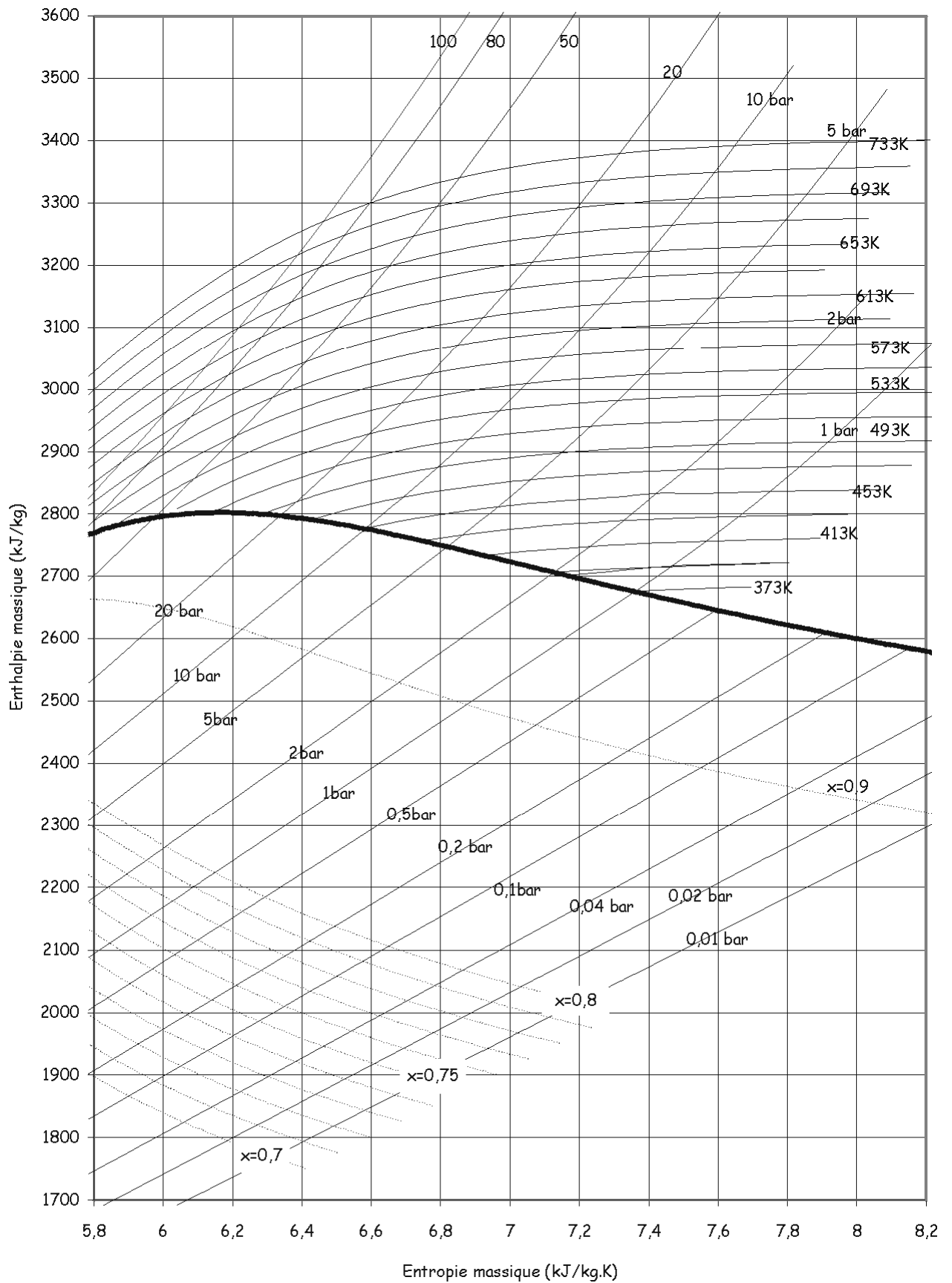


Diagramme de Mollier de l'eau



BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 2000

:Etude du circuit secondaire d'une centrale nucléaire (tranche 1450 MW)

Description des circuits

L'ensemble des valeurs numériques nécessaires se trouve sur les schémas.

Dans le circuit secondaire, la vapeur produite par les générateurs entraîne la turbine. L'eau condensée est recyclée après passage dans des réchauffeurs.

La pression dans la partie secondaire des générateurs de vapeur ① est de 71 bar. L'eau peut ainsi bouillir au contact des tubes du générateur de vapeur, eux-mêmes parcourus par l'eau du circuit primaire. Elle en sort à l'état de vapeur saturée sèche.

La vapeur se détend dans la partie haute pression de la turbine ②. La détente de la vapeur en fait baisser la température. Des gouttelettes de condensation apparaissent. Il faut les séparer car leur impact à grande vitesse endommagerait aubes et directrices. Cette opération est faite à la sortie du corps haute pression, dans un « sécheur-surchauffeur » ③. La vapeur se détend ensuite dans les parties moyenne et basse pression de la turbine.

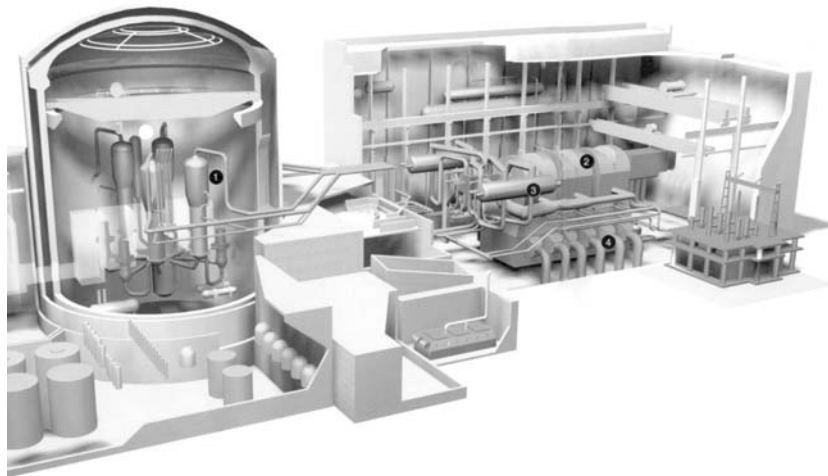
Des prélèvements de vapeur sont effectués à divers niveaux, pour réchauffer les flux retournant à la turbine.

A l'échappement de la turbine, la vapeur se condense sur les tubes du condenseur ④.

A la sortie du condenseur, l'eau du circuit secondaire est reprise par des pompes d'extraction, placées en contrebas du condenseur, au fond d'un puits de plus de 10 m de profondeur. D'autres pompes font monter la pression jusqu'à celle d'alimentation du générateur de vapeur.

L'eau de refroidissement du circuit secondaire est alors dirigée vers le réfrigérant atmosphérique (⑤) où elle est dispersée en fines gouttelettes en pluie face à un courant d'air ascendant. Une faible proportion de cette eau est évaporée, cédant ainsi de la chaleur à l'air.

La centrale nucléaire 1450 MW



① **Générateur vapeur** (x 4)
 · hauteur : 21,90 m
 · diamètre supérieur : 4,76 m
 · diamètre inférieur : 3,70 m
 · masse : 421 tonnes

② **Turbine « Arabelle »**
 · longueur : 51,205 m
 · largeur (hors tout) : 12,80 m
 · masse : 2810 tonnes

③ **Sécheur surchauffeur** (x2)
 · longueur : 24,80 m
 · diamètre : 4,70 m
 · masse : 370 tonnes
 · température : 180°C
 · pression : 10 bar

④ **Condenseur**
 · longueur : 37,10 m
 · largeur : 21,50 m
 · hauteur : 15,49 m
 · masse vide : 1893 tonnes
 · nombre de tubes : 128856
 · surface d'échange : 103227 m²
 · débit eau refroidissement : 48,35 m³/s
 · temp. entrée eau : 21,5°C
 · temp. sortie eau : 35°C

1 Les numéros font référence à l'éclaté de la centrale .



TURBINE « ARABELLE » - CARACTÉRISTIQUES

1 corps haute pression - moyenne pression (HP - MP)

3 corps basse pression (BP)

Caractéristiques de la vapeur :

· Entrée corps HP : 71 bar T = 286,7°C

 Débit = 2176 kg/s

· Entrée corps MP : 10,05 bar T = 268,3°C

 Débit = 1482 kg/s

· Entrée corps BP : 3,2 bar T = 151,04°C

 Débit = 460 kg/s pour chaque corps

· Vitesse de rotation : 1500 tours/min

· Puissance électrique : 1520 MW

Source : EDF (extraits de la brochure N4)

Etude de la turbine

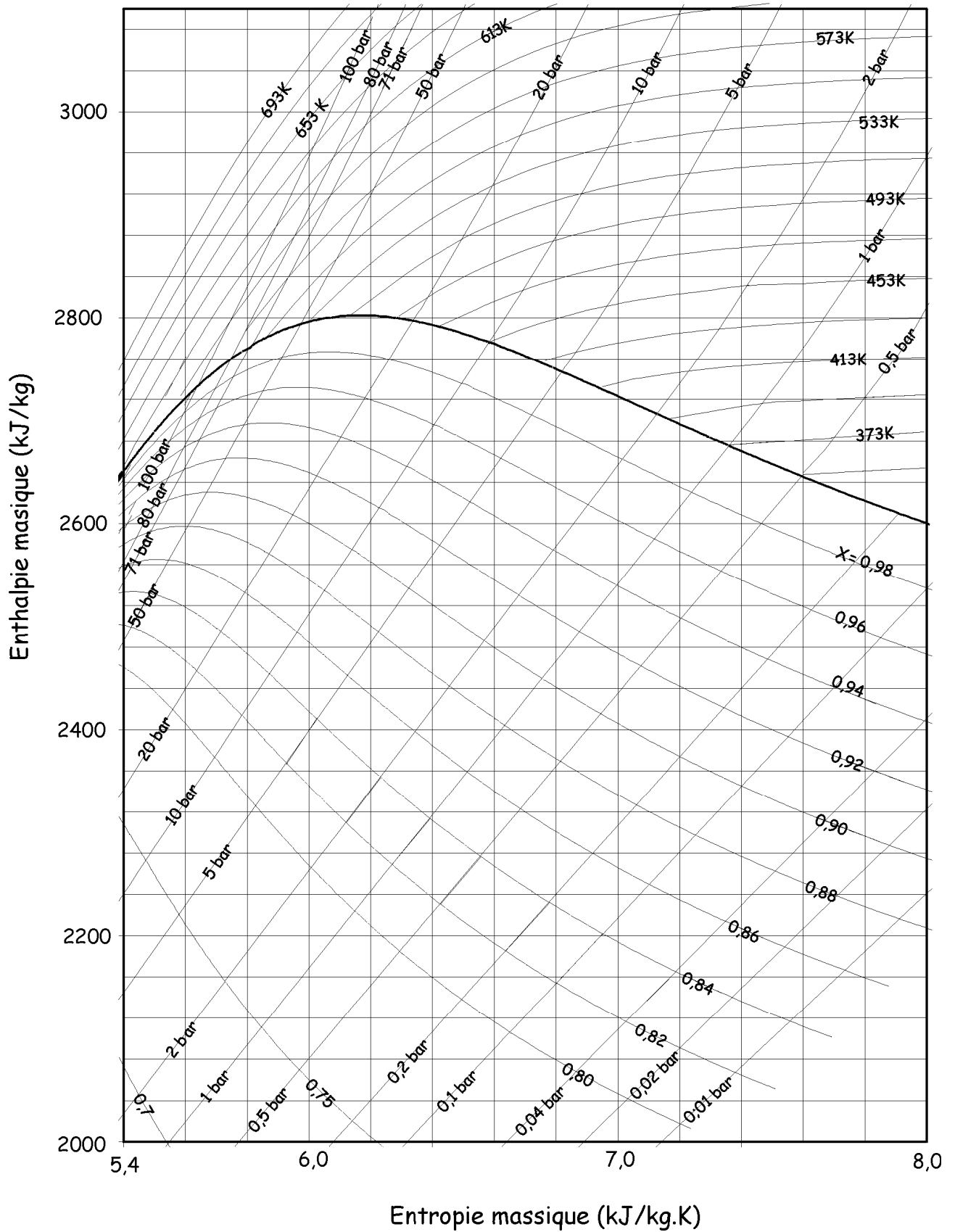
1. Placer sur le diagramme de Mollier le point A correspondant à l'entrée de la vapeur dans le corps HP de la turbine. Relever l'enthalpie massique h_A . Ces données seront récapitulées dans un tableau lors de la question 5.
2. La détente dans le corps HP se fait de manière isentropique. Le mélange eau-vapeur en sort dans les conditions d'entrée dans le sécheur-surchauffeur[®]. Placer sur le diagramme le point B, relever l'enthalpie massique h_B .
3. Le sécheur-surchauffeur élève la température du mélange, en le séchant, jusqu'aux conditions d'entrée dans le corps MP. Placer le point C sur le diagramme, et relever l'enthalpie massique h_C .
4. Dans les corps MP et BP la détente est isentropique. La vapeur sort des corps BP à la pression de 0,2 bar. Placer les points D (sortie de MP) et E (sortie de BP). Relever les enthalpies massiques h_D et h_E , ainsi que le titre massique en vapeur du mélange sortant du corps BP : x_E .
5. Reproduire sur votre copie et compléter le tableau suivant :

Point	Pression	Enthalpie massique	Etat physique
Unité			
A			
B			
C			
D			
E			

Représenter sur le diagramme, qui sera rendu avec la copie les transformations précédentes en justifiant les tracés.

6. On souhaite calculer la puissance totale cédée par la vapeur à la turbine. Pour cela, on utilise le tableau précédent ainsi que le débit assuré par le corps HP à la turbine.
 - 6.1. Calculer la puissance cédée par la vapeur au corps HP
 - 6.2. La puissance au corps MP est de $P_2 = 341$ MW, celle cédée aux corps BP est $P_3 = 621$ MW. Calculer la puissance cédée par la vapeur à la turbine.
 - 6.3. Comparer cette puissance à la puissance électrique de la turbine. Quelles causes expliquent la différence ?

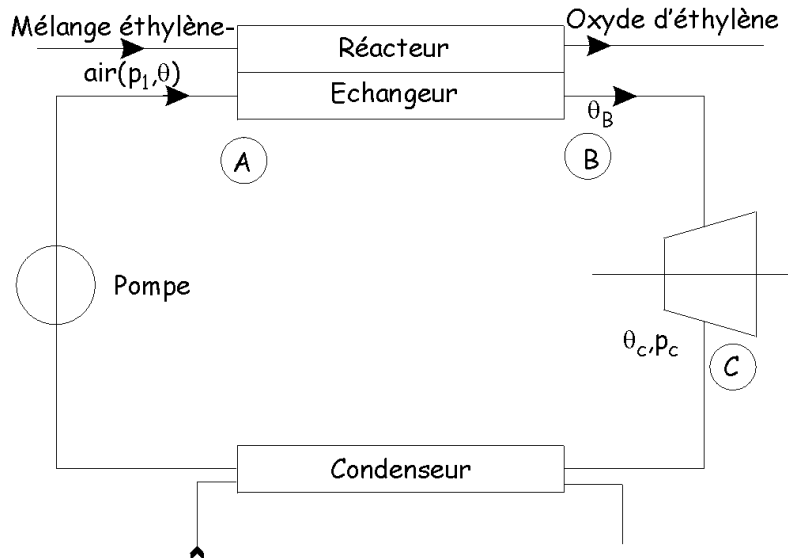
Diagramme de Mollier de l'eau



BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 2002

Étude d'une unité de fabrication en continu d'oxyde d'éthylène

L'oxyde d'éthylène est obtenu par oxydation directe sous pression, de l'éthylène par le dioxygène de l'air. Cette réaction est exothermique et l'énergie thermique correspondante Q_1 est transférée à un circuit d'eau, dans un « réacteur échangeur ». Voir schéma ci-dessous



La quantité de chaleur Q_1 est égale à $5,48 \times 10^5$ kJ pour 1 kmol d'oxyde d'éthylène fabriqué.

La pression p dans l'échangeur est égale à 10 bar.

Dans l'échangeur l'eau sort à la température $\theta_B = 300$ °C (point B). Elle subit une détente isentropique dans la turbine jusqu'à une pression p_C . La teneur en liquide en sortie de turbine (C) est égale à 4 %. La liquéfaction se termine dans un condenseur, et l'eau est renvoyée en entrée d'échangeur (A) à l'aide d'une pompe.

Documentation : diagramme de Mollier.

Données : enthalpie massique de l'eau en A : $h_A = 310$ kJ · kg⁻¹.

constante des gaz parfaits : $R = 8,32$ J · mol⁻¹ · K⁻¹.

1. Échangeur

- 1.1. En utilisant le diagramme de Mollier, expliquer que l'eau en B est à l'état de vapeur sèche surchauffée.
- 1.2. Déterminer la variation d'enthalpie massique de l'eau entre A et B.
- 1.3. Utiliser le résultat précédent pour montrer que la masse m de vapeur sortant de l'échangeur par kmol d'oxyde d'éthylène fabriqué, est environ égale à 200 kg.

2. Turbine

- 2.1. Représenter sur le diagramme de Mollier la transformation BC.
- 2.2. Déterminer les valeurs de p_C et θ_C en sortie de turbine
- 2.3. Calculer le travail massique échangé entre le fluide et la turbine, le rendement étant de 70%.
- 2.4. En déduire le travail correspondant à la fabrication d'1 kmol d'oxyde d'éthylène.

3. Étude de la compression du mélange éthylène-air.

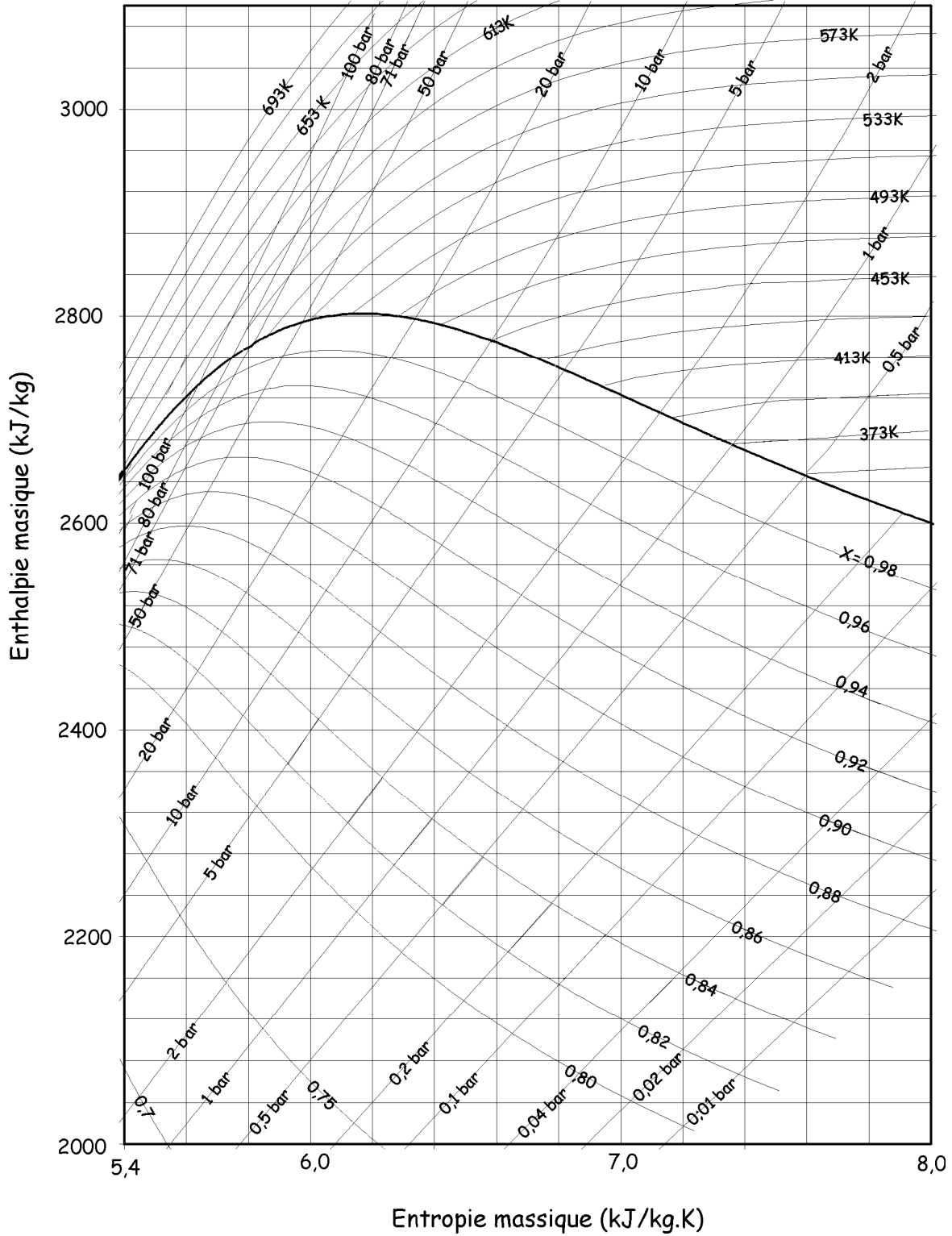
Le mélange éthylène-air est disponible à la pression $p_1 = 1,0$ bar. Il est comprimé à la température constante $\theta = 25$ °C jusqu'à une pression $p_2 = 15,3$ bar.

Le travail de compression pour une transformation réversible, à la température constante T , d'une quantité de matière n d'un gaz parfait, d'une pression p_1 à une pression p_2 , est donné par la relation suivante :

$$W = nRT \ln \frac{p_2}{p_1}$$

3.1. Sachant que la fabrication d'1 kmol d'oxyde d'éthylène nécessite une quantité de matière totale en mélange éthylène-air égale à 12,3 kmol, en déduire le travail de compression isotherme de ce mélange. Le mélange sera assimilé à un gaz parfait. Les compresseurs utilisés ayant un rendement égal à 60 %, quel travail doivent-ils réellement fournir

Diagramme de Mollier de l'eau



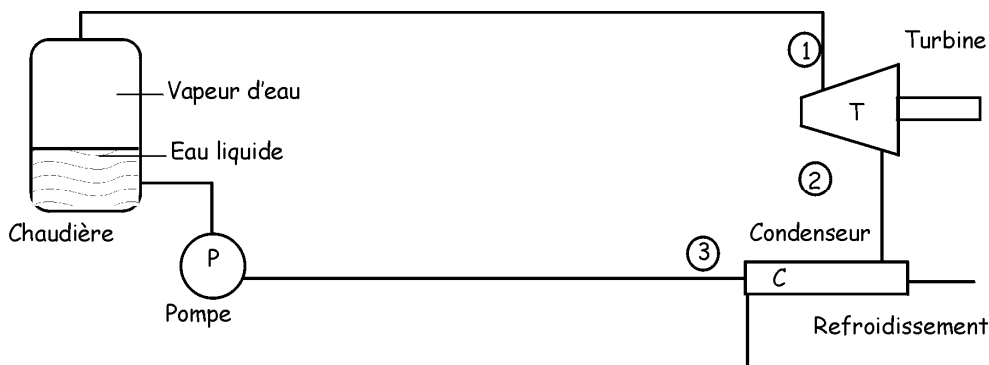
BTS Techniques Physiques pour l'Industrie et le Laboratoire 1998

REMARQUES IMPORTANTES :

Le sujet comporte deux parties A et B complètement indépendantes. A l'intérieur de ces parties les questions sont regroupées sous des paragraphes (ex : I, II,...). Les paragraphes sont indépendants les uns des autres, ou les résultats des paragraphes précédents, qu'ils utilisent, vous sont donnés. Enfin, à l'intérieur même des paragraphes de nombreuses questions peuvent être résolues sans les précédentes.

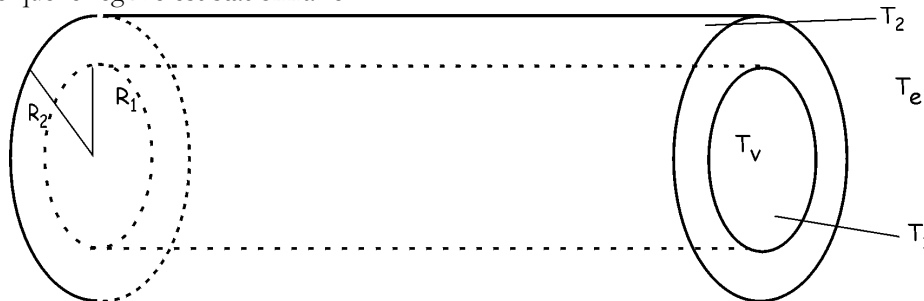
Plusieurs questions de ce problème sont qualitatives et ne nécessitent donc aucun calcul.

Schéma de la centrale thermique étudiée :



PARTIE A : Pertes de chaleur dans les tuyaux d'arrivée de la vapeur

La vapeur surchauffée parvient à la turbine par des tuyaux cylindriques de rayon intérieur R_1 et de rayon extérieur R_2 . Le matériau a une conductivité thermique λ . A l'intérieur, la vapeur d'eau est à une température T_v . La paroi intérieure du tuyau s'élève à une température T_1 et la paroi extérieure à une température T_2 . L'air à l'extérieur est à la température T_e . On appellera L la longueur du tuyau. Nous supposons que le régime est stationnaire.



I. Propagation de la chaleur à travers la paroi du tuyau :

La chaleur se propage à travers la paroi cylindrique par conduction. La densité de courant de chaleur est

donnée par la loi de FOURIER : $\vec{j}_c = -\lambda \frac{dT}{dr} \vec{n}$

1. Donner la signification physique de la loi citée ci-dessus en précisant qualitativement quels paramètres influent sur le transfert de chaleur. Sur un schéma, représenter \vec{j}_c .

2. La quantité de chaleur qui traverse un élément de surface dS de la paroi, chaque seconde, est $d\Phi_c = J_c \cdot dS$. On l'appelle flux de chaleur traversant dS .

Le flux de chaleur $\Phi_c(r)$, traversant le cylindre de rayon r ($R_1 < r < R_2$) et de longueur L , s'exprime par :

$$\Phi_c(r) = -2\pi r L \lambda \frac{dT}{dr}$$

Pourquoi peut on dire que, dans notre cas, Φ_c est indépendant de r ?

En intégrant l'expression obtenue, on montre que :

$$\Phi_c = -2L\pi\lambda \frac{(T_2 - T_1)}{L \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

Ce résultat n'est pas à démontrer, mais il vous sera utile par la suite.

II. Echanges entre les parois et les fluides :

Les échanges thermiques entre la vapeur d'eau et la paroi intérieure d'une part et entre la paroi extérieure et l'air ambiant d'autre part, sont de type convectifs. Ils suivent une loi de NEWTON, dans laquelle le flux de chaleur traversant un élément dS de la paroi est donné par la relation : $d\Phi = h dS \Delta T$. h est le coefficient de convection et ΔT est la différence de température entre le fluide et la paroi. On supposera que h est le même pour les deux surfaces d'échange.

1. Expliciter Φ_{int} , le flux thermique entre la vapeur et la paroi intérieure.
2. Expliciter Φ_{ext} , le flux thermique entre la paroi extérieure et l'air ambiant.

III. Calcul des pertes du tuyau :

1. Pourquoi peut-on écrire que $\Phi_c = \Phi_{\text{int}} = \Phi_{\text{ext}}$? Quelle relation y a-t-il entre ces flux et les pertes de chaleur par unité de temps du tuyau?
2. A l'aide des expressions trouvées au I et II exprimer $(T_v - T_1)$, $(T_1 - T_2)$ et $(T_2 - T_e)$.

3. En déduire que les pertes de chaleur par unité de temps, Φ valent:
$$\Phi = \frac{2\pi \cdot L \cdot (T_v - T_e)}{\frac{1}{R_1 b} + \frac{L \cdot \frac{R_2}{R_1}}{\lambda} + \frac{1}{R_2 b}}$$

4. Application numérique : $R_1 = 3,5 \text{ cm}$; $R_2 = 4,0 \text{ cm}$; $L = 1 \text{ m}$; $T_v = 300^\circ\text{C}$; $T_e = 25^\circ\text{C}$; $\lambda = 55,5 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $b = 23,3 \text{ W m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Calculez Φ .

5. Que pensez-vous de cette valeur? Comment peut-on faire pour limiter ces pertes?

PARTIE B : Etude de la partie turbine-condenseur

Les données nécessaires à cette partie sont regroupées ci-dessous.

	Pression (Pa)	Température ($^\circ\text{C}$)
Entrée de la turbine (1)	$2,0 \times 10^6$	300
Sortie de la turbine et entrée du condenseur (2)	$1,5 \times 10^4$	54
Sortie du condenseur (3)	$1,5 \times 10^4$	46

Données thermodynamiques sur la vapeur saturée :

Pression kPa	Temp. $^\circ\text{C}$	Vol. massique $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$		Energie interne $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$		Enthalpie $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	
		Liq. sat.	Vap. Sat.	Liq. sat.	Vap. Sat.	Liq. sat.	Vap. Sat.
5	33	0,001005	28,19	137,81	2420,5	137,82	2561,5
7,5	40	0,001008	19,24	168,78	2430,5	168,79	2574,8
10	46	0,001010	14,67	191,82	2437,9	191,83	2584,7
15	54	0,001014	10,02	225,92	2448,7	225,94	2599,1
20	60	0,001017	7,649	251,38	2456,7	251,40	2609,7
25	65	0,001020	6,204	271,9	2463,1	271,93	2618,2

Données thermodynamiques sur la vapeur surchauffée :

Température $^\circ\text{C}$	Pression : $1,80 \times 10^6 \text{ Pa}$			Pression : $2,00 \times 10^6 \text{ Pa}$		
	vol. mass. $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Energie int. $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Enthalpie $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	vol. mass. $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Energie int. $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Enthalpie $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
225	0,11673	2636,6	2846,7	0,10377	2628,3	2835,8
250	0,12497	2686,0	2911,0	0,11144	2679,6	2902,5
300	0,14021	2776,9	3029,2	0,12547	2772,6	3023,5
350	0,15457	2863,0	3141,2	0,13857	2859,8	3137,0
400	0,16847	2947,7	3250,9	0,15120	2945,2	3247,6

Capacité thermique massique de l'eau considérée constante :

$$C_e = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Chaleur latente de vaporisation de l'eau :

$$L_v = 2370 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Débit massique de la vapeur en entrée de turbine :

$$Q_{mv} = 1,5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Débit massique de l'eau de refroidissement dans le condenseur :

$$Q_{me} = 200 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Température de l'eau de refroidissement :

$$T_e = 15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

1. Décrire brièvement le cycle de fonctionnement d'une telle installation.
2. On fait l'hypothèse que, lors du passage dans la turbine, la vapeur subit une détente adiabatique. Nous allons nous intéresser aux échanges à ce niveau.
 - 2.1. Quelle est la caractéristique d'une transformation adiabatique?
 - 2.2. Le travail des forces de pesanteur ainsi que la variation d'énergie cinétique subie par l'unité de masse du fluide sont supposées négligeables devant les autres quantités d'énergie échangées.
 - 2.2.1. Rappeler l'expression de la conservation de l'énergie pour l'unité de masse de gaz passant de la pression P_1 et du volume V_1 à la pression P_2 et au volume V_2 en recevant le travail mécanique W_T de la part de la turbine. Exprimer cette relation en fonction des enthalpies H_1 et H_2 .
 - 2.2.2. Calculer le travail fourni par 1 kg de vapeur d'eau à la turbine lors de son passage.

BTS Industries papetières 2000 :

Les parties A et B sont indépendantes, ainsi que la plupart des questions dans chacune de ces parties. Dans le procédé kraft, afin d'optimiser la récupération d'énergie lors de l'incinération des résidus organiques et de réduire la pollution de l'air et de l'eau, on concentre la liqueur noire extraite des piles laveuses de pâte écrue dans des évaporateurs à effet multiple pour former une liqueur noire très forte. La majeure partie de l'eau est éliminée dans une série d'évaporateurs exploités à des pressions différentes de telles sortes que les buées sortant d'un étage soient la source de vapeur de l'étage suivant. Le principal avantage d'un tel système est sa capacité d'évaporation élevée, dépassant 5 kg d'eau évaporée par kg de vapeur vive pour un système à sept effets.

Partie A.

Les caractéristiques globales d'un évaporateur à six effets sont les suivantes

	Débit (kg/h)	Température (°C)	Pression relative (kPa)
Vapeur vive	23×10^3	135	213

	Débit de liqueur (kg/h)	% de matières sèches
A l'entrée	$151,2 \times 10^3$	13,9
A la sortie	$40,4 \times 10^3$	52

On donne :

pression atmosphérique $p_{atm} = 1,0 \text{ bar}$; $p_{normale} = 76 \text{ cm de Hg} = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$.

A partir des données précédentes et à l'aide du document 2, répondre aux questions suivantes

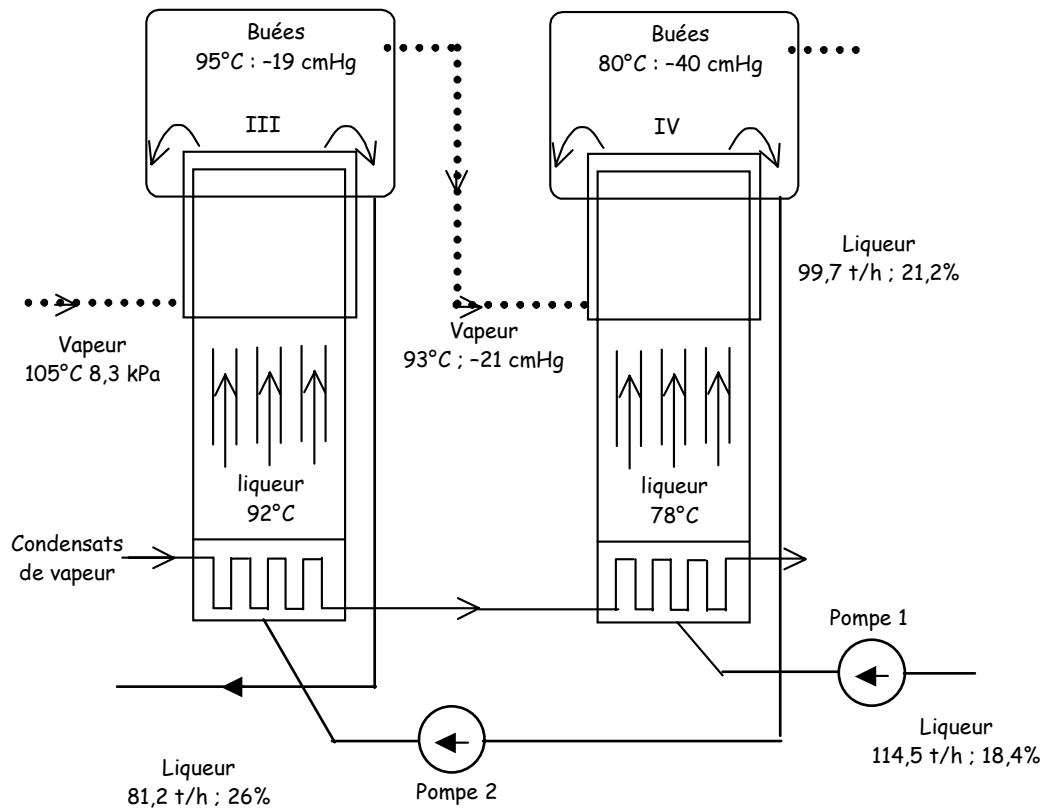
1. Calculer la pression absolue de la vapeur vive.
2. Cette vapeur vive est-elle sèche ou saturante ? En déduire sa masse volumique ρ .
3. Calculer le débit volumique de vapeur vive (en m^3/s).
4.
 - 4.1. Déterminer l'enthalpie massique h_{vap} de la vapeur vive.
 - 4.2. On suppose qu'à la sortie du circuit de vapeur, on récupère toute l'eau à la température de 50°C , à l'état liquide.
 - 4.2.1. Calculer la variation d'enthalpie massique de ce fluide
 - 4.2.2. En déduire la puissance thermique fournie par la vapeur (en MW).
5. Quel est le débit horaire de matières sèches que contient la liqueur ?
6. Calculer la masse d'eau (en kg) évaporée par kg de vapeur vive.

Partie B.

On s'intéresse à l'étage IV de l'évaporateur (document 1).

1. Montrer que la pression absolue (en bars) des vapeurs à l'entrée de l'étage IV de l'évaporateur est 0,72 bar.
2. Vérifier qu'à l'entrée de l'étage IV, la vapeur est sèche. On fera une interpolation linéaire (voir document 2)
3. Calculer la masse d'eau extraite de la liqueur par heure dans l'étage IV.

DOCUMENT 1.



Les pressions indiquées sont des pressions relatives

DOCUMENT 2.

CARACTERISTIQUES DE L'EAU A L'EQUILIBRE LIQUIDE VAPEUR

Température (°C)	Pression absolue (bar)	Volume massique v ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)		Enthalpie massique h ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	
		Liquide	Vapeur	Liquide	Vapeur
0,01	0,0061	0,001000	206,3	0,0	2501
5	0,0087	0,001000	147,2	21,1	2510
10	0,0123	0,001000	106,4	42,0	2519
15	0,0170	0,001001	78,0	63,0	2528
20	0,0234	0,001002	57,8	83,9	2537
25	0,0317	0,001003	43,4	104,8	2547
30	0,0424	0,001004	32,9	125,7	2556
35	0,0562	0,001006	25,2	146,6	2565
40	0,0737	0,001008	19,6	167,5	2574
45	0,0958	0,001010	15,3	188,4	2583
50	0,123	0,001012	12,0	209,3	2592
55	0,157	0,001014	9,58	230,2	2600
60	0,199	0,001017	7,68	251,1	2609
65	0,250	0,001020	6,20	272,1	2817
70	0,312	0,001023	5,05	293,0	2626
75	0,386	0,001026	4,13	314,0	2635
80	0,474	0,001029	3,41	334,9	2643
85	0,578	0,001032	2,83	355,9	2651
90	0,701	0,001036	2,36	377,0	2659
95	0,845	0,001040	1,96	398,0	2667
100	1,013	0,001044	1,67	419,1	2675
105	1,208	0,001047	1,42	440,2	2683
110	1,433	0,001052	1,21	461,3	2691
115	1,690	0,001056	1,04	482,5	2698
120	1,985	0,001060	0,892	503,7	2706
125	2,321	0,001065	0,770	525,0	2713
130	2,701	0,001070	0,668	546,3	2721
135	3,13	0,001075	0,582	567,5	2727
140	3,61	0,001080	0,507	589,0	2734
145	4,16	0,001085	0,446	610,5	2740
150	4,76	0,001090	0,393	632,2	2746
155	5,43	0,001096	0,347	653,9	2752
160	6,18	0,001102	0,307	675,6	2758
165	7,01	0,001108	0,273	697,3	2763
170	7,92	0,001114	0,243	719,2	2768
175	8,93	0,001121	0,217	741,1	2773
180	10,09	0,001128	0,194	763,3	2778
185	11,23	0,001134	0,173	785,2	2782
190	12,55	0,001142	0,156	807,5	2786
195	13,97	0,001149	0,141	829,9	2790
200	15,55	0,001157	0,127	852,4	2793
205	17,25	0,001164	0,115	875,0	2796
210	19,06	0,001173	0,104	897,7	2798