

CCP PC 2014

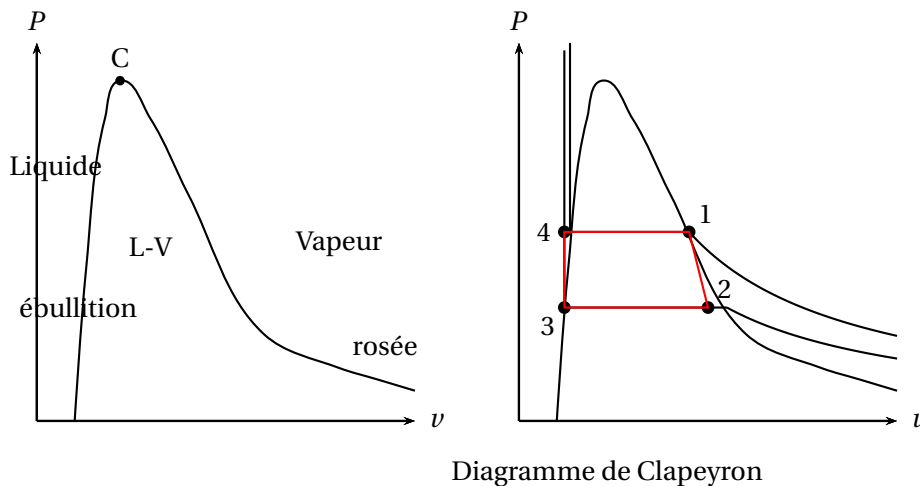
PSI* 12/2016

A THERMODYNAMIQUE DANS UN REACTEUR A EAU PRESSURISEE

A.1 Etude thermodynamique du circuit secondaire simplifié

A.1.1 Questions préliminaires

1. Le liquide saturant se trouve sur la courbe d'ébullition et la vapeur saturante sur la courbe de rosée.



2. Dans la zone liquide, le liquide est peu compressible, donc $v \approx C^{te}$. Dans la zone vapeur, loin du point critique, on peut utiliser le modèle du gaz parfait, on a alors $P = \frac{rT}{v}$ soit une hyperbole. Dans la zone diphasique, la variance de $1=2(P,T)-1(K=\Pi)$ impose $P = P(T)$, donc une horizontale. La température du point critique est de 647 K, et $647 > 559 > 306$, ce qui permet de placer l'isotherme $T = 559$ K au-dessus de 306.
3. D'après le second principe, $dS = \frac{\delta Q}{T_{ech}} + \delta S_c$. Adiabatique soit $\delta Q = 0$ et réversible soit $\delta S_c = 0$, on a bien $dS = 0$, soit une isentropique.
4. $dh = Tds + v dP$ qui s'intègre en , soit $\Delta h = v \Delta P = 7$ kJ/kg. D'autre part $dh = \delta q + \delta w$ qui s'intègre en $w = \Delta h$. D'après les données du texte, on en déduit $h \approx C^{te}$.

A.1.2 Etude du cycle thermodynamique simplifié

Point	P/bar	T/K	Etat du fluide	h(kJ/kg)	s(kJ/kg/K)	x
1	70	559	Vapeur sat.	2 773,5	5,8162	1
2	0,05	306	Mélange diph.	1772	5,8162	0,675
3	0,05	306	Liquide sat.	137,8	0,4763	0
4	70	306	Liquide	137,8	0,4763	0

1. Voir ci-dessus

2. Dans la turbine adiabatique réversible $s = C^{te}$, on a donc
 $s_1 = s''(559) = s_2 = x_2 s''(306) + (1 - x_2) s'(306)$, $x_2 = 0,675$. On en déduit l'enthalpie massique
 $h_2 = x_2 h''(306) + (1 - x_2) h'(306) = 1772 \text{ kJ/kg}$. $\Delta h = w_{iT} = h_2 - h_1 = -1001,5 \text{ kJ/kg}$. Il y a donc de l'eau liquide dans la turbine qui peut endommager les pales.
3. L'état étant liquide $x_3 = 0$, et le liquide étant saturant est à la température d'équilibre liquide-vapeur soit 306 K. Il n'y a pas de partie mobile dans le condenseur soit $w = 0$ et donc $\Delta h = q_{eC} = h_3 - h_2 = -1634 \text{ kJ/kg}$.
4. Il n'y a pas de partie mobile dans le générateur de vapeur, $\Delta h = q_{eGV} = h_1 - h_4 = 2635,7 \text{ kJ/kg}$ avec $h_3 \approx h_4$ d'après les propriétés de la pompe.
5. $\eta = \frac{|w_{iT}|}{q_{eGV}} = 0,38$. $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{Cond}}}{T_{\text{max}}} = 0,45$. La différence de rendement vient du fait qu'une partie de l'échange thermique entre la source chaude et le fluide se fait avec un écart de température non négligeable, cause de création d'entropie.

A.2 Etude thermodynamique du circuit secondaire réel

Point	P/bar	T/K	Etat du fluide	h(kJ/kg)	s(kJ/kg/K)	x	D_m (kg/s)
1	70	559	Vapeur sat	2 773,5	5,8162	1	1500
2	10	453	Mélange diph.	2429	5,8162	0,83	1400
3	10	453	Vapeur sat.	2776,2	6,5828	1	1159
4	10	453	Liquide sat.	762,6	2,1382	0	241
5	10	524!	Vapeur surchauffée	2 943,0	6,9259	1	1159
6	0,05	306	Mélange diph.	2112,1	6,9259		1159
7	0,05	306	Liquide sat.	137,8	0,4763	0	1159
8	10	306	Liquide	$\approx 137,8$		0	1159
9	10		Liquide	285		0	1500
10	70		Liquide	≈ 285		0	1500
11	70	474	Liquide sous-saturé	840,3 < h'		0	100
12	10	453	Mélange diph.	840,3		0,04	100

A.2.1

Adiabatique réversible soit $s_2 = s_1 = s''(559) = x_2 s''(453) + (1 - x_2) s'(453)$, $x_2 = 0,828$ et $h_2 = x_2 h''(453) + (1 - x_2) h'(453) = 2429 \text{ kJ/kg}$. $w_{iTHP} = \Delta h = h_2 - h_1 = -344,6 \text{ kJ/kg}$. $P_{HP} = D_{m2} w_{iTHP} = 481 \text{ MW}$

A.2.2

Conservation de la masse $D_{m2} = D_{m3} + D_{m4}$, et transformation « isenthalpique », pas de partie mobile et calorifugé, $D_{m2} h_2 = D_{m3} h_3 + D_{m4} h_4$. $D_{m3} = D_{m2} \frac{h_2 - h_4}{h_3 - h_4} = 1159 \text{ kg/s}$ et $D_{m4} = D_{m2} \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3} = 241 \text{ kg/s}$. $D_{m3} = x_2 D_{m2} = 1159 \text{ kg/s}$ et $D_{m4} = (1 - x_2) D_{m2} = 241 \text{ kg/s}$.

A.2.3

Le surchauffeur est de nouveau « isenthalpique », $D_{m1} h_1 + D_{m3} h_3 = D_{m11} h_{11} + D_{m3} h_5$, puisque par conservation du débit $D_{m1} = D_{m11}$ et $D_{m3} = D_{m5}$. Soit $h_{11} = h_1 + \frac{D_{m3}}{D_{m11}} (h_3 - h_5) = 840,3 \text{ kJ/kg}$

Remarque : le surchauffeur est mal dessiné, il doit être à contre courant de manière à avoir 11 et 3 d'un côté avec $T_{11} > T_3$ et 1 et 5 de l'autre côté avec $T_1 > T_5$ ce qui conduit bien à un transfert thermique de (11,1) vers (3,5).

A.2.4

$$P_{BP} = D_{m5} w_{iTBP}. \quad w_{iTBP} = h_6 - h_5 = -830,9 \text{ kJ/kg, soit } h_6 = 2112,1 \text{ kJ/kg et}$$

$$h_6 = x_6 h''(306) + (1 - x_6) h'(306), \text{ qui donne } x_6 = \frac{h_6 - h'(306)}{h''(306) - h'(306)} = 0,81 \text{ confirmé par}$$

$$x_6 = \frac{s_6 - s'(306)}{s''(306) - s'(306)} = 0,81.$$

A.2.5

$$q_{eC} = h_7 - h_6 = -1974,3 \text{ kJ/kg avec } h_7 = h'(306).$$

A.2.6

Pas de partie mobile, donc pas de travail indiqué; calorifugé donc pas de transfert thermique. $\Delta h = w_i + q = 0$. L'enthalpie se conserve : détente de Joule-Thomson irréversible : $dh = T ds + v dP = 0$, soit $ds > 0$. En tenant compte de $\delta q = 0$, on trouve bien une création d'entropie.

A.2.7

$D_{m4} h_4 + D_{m8} h_8 + D_{m12} h_{12} = D_{m9} h_9$ soit $h_9 = 285 \text{ kJ/kg}$. Le détendeur permet de séparer deux zones à pressions différentes en assurant une conservation de l'énergie au prix d'une augmentation de l'irréversibilité.

A.2.8

$$q_{eGV} = h_1 - h_{10} = 2488,4 \text{ kJ/kg; } P_{GV} = D_{m1} q_{eGV} = 3732 \text{ MW.}$$

A.2.9

$\eta_{cycle} = \frac{P_{TBP} + P_{THP}}{P_{GV}} = 0,387$. On a amélioré le rendement (pas beaucoup!) car le chauffage s'effectue de préférence avec des températures élevées (surchauffeur) ce qui diminue la création d'entropie. L'avantage essentiel est de réduire la quantité de liquide dans la vapeur ($x_6 = 0,81$ et $x_2 = 0,83$ au lieu de $x = 0,67$) ce qui permet de moins endommager les ailettes des turbines.

B RAYONNEMENT

B.1 Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme

B.1.1

$\vec{F} = m \vec{a} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$ projeté sur l'axe z donne $v_z = C^{te}$, or $v_z = 0$ initialement. La trajectoire est donc plane dans le plan Oxy . Dans le repère de Frenet, la force est normale à la trajectoire, la relation précédente projetée sur la normale conduit à $m \frac{v^2}{R} = qvB$, soit $R = \frac{mv}{qB}$. $v = v_0$ car la puissance de la force est nulle. En posant $\vec{\Omega} = \frac{q}{m} \vec{B}$, on obtient $\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v} \wedge \vec{\Omega}$, analogue à $\frac{d\vec{OM}}{dt} = \vec{\Omega} \wedge \vec{OM}$, le vecteur $\vec{v}$ est donc un vecteur tournant à la vitesse angulaire $-\frac{q}{m} \vec{B}$ qui par intégration donne un vecteur $\vec{OM}$ tournant à cette même vitesse.

B.1.2

La différence entre les deux rayons est donc de $d/2$, ce qui nécessite une différence de vitesse de $\frac{qBd}{2m}$. On utilise la conservation de l'énergie mécanique dans l'accélérateur : $qW + \frac{1}{2}mv^2 = 0$.

Les deux masses étant proches, on peut différencier, avec q et W identiques, $2\frac{\delta v}{v} + \frac{\delta m}{m}$, soit $\delta v = \frac{qBD}{2m} = -v\frac{\delta m}{2m}$, soit $v = \frac{qBd}{\delta m}$ et donc $W = \frac{qm(Bd)^2}{2(\delta m)^2} = 5\text{ kV}$.

B.2 Le cyclotron

B.2.1

$T_{1/2} = \frac{\pi R}{v} = \frac{\pi m}{qB}$ ne dépend que du champ magnétique et pas de la vitesse, donc restera constant lors de l'accélération.

B.2.2

Les charges arrivent successivement à droite et à gauche.

B.2.3

Un tour complet correspond à une période, on aura une accélération maximale si l'arrivée à gauche correspond à un maximum de $u(t)$ et à droite à un minimum. On doit donc avoir $\omega = \frac{eB}{m_p}$, $f = 15,3\text{ MHz}$.

B.2.4

Le rayon de la trajectoire donne la vitesse $\frac{eBR_s}{m_p}$ et l'énergie cinétique vaut $E_{cs} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\frac{e^2B^2R_s^2}{m_p}$.

B.2.5

À chaque demi-tour on gagne eU_m , soit $N = \frac{1}{4}\frac{eB^2R_s^2}{m_pU_m} = 60$.

B.2.6 Puissance rayonnée

1. L'accélération vaut $\frac{v^2}{R}$ $P = \frac{\mu_0 q^2 v^4}{6\pi c R_s^2}$. Soit $\alpha = \frac{\mu_0 q^2}{6\pi c R_s^2}$.
2. $E = P \times T_{1/2} = P \times \frac{\pi R_s}{v} = \alpha R_s \pi v^3 = \alpha \pi \frac{R^4 q^3 B^3}{m^3} = 4 \cdot 10^{-30} \text{ J} = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ eV}$ négligeable devant la variation d'énergie cinétique.