

Partie B - Cycle de Rankine

1. > Voir figure 5.37.

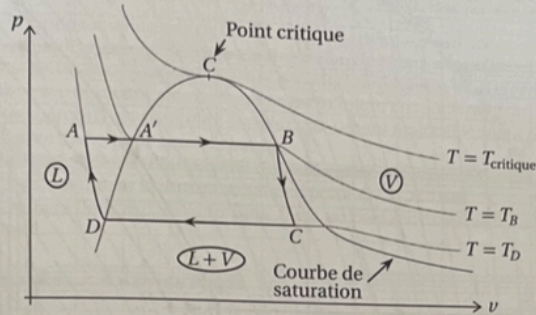


Figure 5.37. Représentation du cycle de Rankine dans le diagramme de Clapeyron (p, v). L : domaine liquide pur; $L + V$: domaine d'équilibre liquide-vapeur; V : domaine de vapeur sèche.

2. > En A' , l'eau est dans l'état de liquide saturant à la pression $p_2 = 55$ bar ce qui correspond, d'après la table, à une température de $\theta_2 = 270$ °C. L'enthalpie et l'entropie massiques de l'eau en A' sont donc respectivement $h_f(270$ °C) et $s_f(270$ °C).

> En B , l'eau est dans l'état de vapeur saturante à la pression $p_2 = 55$ bar ce qui correspond, d'après la table, à une température de $\theta_2 = 270$ °C. L'enthalpie et l'entropie massiques de l'eau en B sont donc respectivement $h_g(270$ °C) et $s_g(270$ °C).

> En D , l'eau est dans l'état de liquide saturant à la pression $p_1 = 43$ mbar ce qui correspond, d'après la table, à une température de $\theta_1 = 30$ °C. L'enthalpie et l'entropie massiques de l'eau en D sont donc respectivement $h_f(30$ °C) et $s_f(30$ °C).

> Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous :

	θ (°C)	h (kJ.kg ⁻¹)	s (J.K ⁻¹ .kg ⁻¹)
A'	270	1190,10	2,9853
B	270	2788,46	5,9226
D	30	125,22	0,4348

après la question précédente, on possède les coordonnées des points A' , B et D dans le diagramme (p, h) :

$$A' \quad (h_{A'} = 1190,10 \text{ kJ.kg}^{-1}, p_{A'} = 55 \text{ bar})$$

$$B \quad (h_B = 2788,46 \text{ kJ.kg}^{-1}, p_B = 55 \text{ bar})$$

$$D \quad (h_D = 125,22 \text{ kJ.kg}^{-1}, p_D = 43 \text{ mbar}).$$

De plus, en D et A' , l'eau est sous forme de liquide saturant c'est-à-dire que D et A' se situent sur la courbe d'ébullition et en B , l'eau est sous forme de vapeur saturante donc B se situe sur la courbe de rosée.

> La transformation $B \rightarrow C$ est une détente adiabatique réversible, c'est-à-dire isentropique. Dans le diagramme (p, h) la courbe décrivant cette transformation est une courbe partant de B qui est parallèle à la courbe isentropique la plus proche. On trouve le point C à l'intersection de cette isentropique et de l'isobare à $p_1 = 43$ mbar.

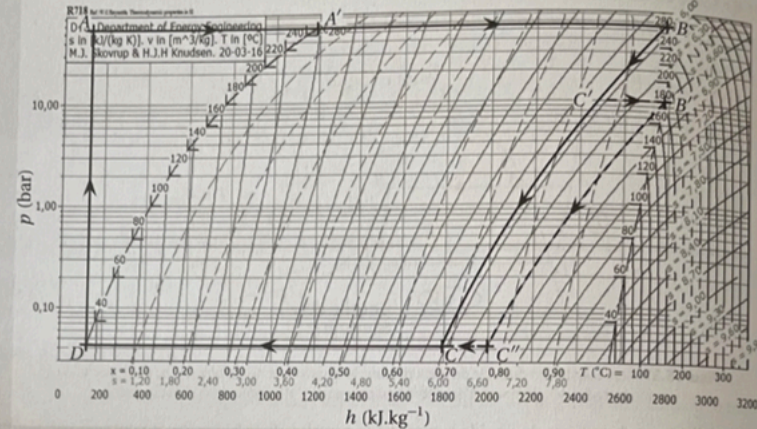


Figure 5.38. En noir, représentation du cycle de Rankine dans le diagramme (p, h) (Partie B question 3.). En pointillés, représentation de la surchauffe du cycle de Rankine (Partie C question 1.)

Remarque

Sur la figure 5.38, l'ensemble du cycle de Rankine a été représenté. Pour répondre à la question, il suffit de placer les points A' , B , C et D dans le diagramme (p, h).

4. > En négligeant les variations des énergies cinétique et potentielle, le premier principe pour un fluide en écoulement dans un organe de la machine (premier principe industriel) s'écrit :

$$h_s - h_e = w_u + q,$$

où h_e et h_s sont respectivement des enthalpies en entrée et en sortie de l'organe.

5. > Dans la turbine, l'eau subit une transformation adiabatique donc $q_{BC} = 0$. Le premier principe industriel appliqué à l'eau en écoulement dans la turbine donne :

$$h_C - h_B = w_{BC}.$$

> D'après la question 2., $h_B = 2788,46 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

Par lecture graphique, on obtient $h_C = 1,79.10^3 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Il vient alors $w_{BC} = -1,00.10^3 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

6. > Il n'y a aucune pièce mécanique mobile dans le générateur de vapeur donc $w_{AA'} = 0$. Le premier principe industriel appliqué à l'eau liquide en écoulement dans le générateur de vapeur donne :

$$h_{A'} - h_A = q_{AA'}.$$

> Dans la transformation de A à A' , l'eau liquide est chauffée de manière isobare. L'eau liquide peut être considérée comme une phase incompressible et indilatable pour laquelle l'enthalpie ne dépend que de la température et $h_{A'} - h_A = c_e(T_{A'} - T_A)$ avec c_e la capacité thermique massique de l'eau. On a donc :

$$q_{AA'} = c_e(T_{A'} - T_A) \approx c_e(T_D - T_A) = 1,00.10^3 \text{ kJ.kg}^{-1}.$$

7. > Le fluide est toujours dans le générateur de vapeur, l'absence de pièces mécaniques mobiles donne $w_{AB} = 0$. Le premier principe industriel appliqué à l'eau diphasée en écoulement dans le générateur de vapeur donne :

$$h_B - h_{A'} = q_{A'B}.$$

> D'après la question 2., $h_B = 2788,46 \text{ kJ.kg}^{-1}$ et $h_{A'} = 1190,10 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Il vient alors $q_{A'B} = 1598,36 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

6. Le rendement de l'installation est :

$$\rho_R = \frac{-w_{BC}}{q_{AA'} + q_{A'B}} = 0,38.$$

- On remarque que le rendement du cycle de Rankine est supérieur au rendement réel $\rho_R > \rho$. En effet, les transformations dans les différents organes ne sont pas idéales réduisant ainsi le rendement de ce cycle.
- On remarque que le rendement du cycle de Rankine est inférieur au rendement de Carnot $\rho_R < \rho_C$. Ceci montre l'existence de sources d'irréversibilité dans le cycle venant majoritairement du chauffage de l'eau liquide entre A et A' avec une unique source chaude.
- En sortie de la turbine, l'eau est dans un état diphasé repéré par le point C dans le diagramme (p, h).
- Par lecture graphique, on obtient le titre en vapeur au point C : $x_C = 0,68$.
- L'eau étant partiellement liquide dans la turbine, il y a un risque de corrosion des pièces métalliques constituant la turbine.

Partie C - Cycle de Rankine avec détente étagée

1. Voir figure 5.38.
2. On lit graphiquement les titres en vapeur de l'eau aux points C' et C'' :

$$x_{C'} = 0,86 \quad \text{et} \quad x_{C''} = 0,77.$$

- $x_{C'} > x_C$ et $x_{C''} > x_C$, la proportion en liquide du mélange liquide-vapeur dans la turbine est donc moindre avec la surchauffe. Le risque de corrosion est ainsi réduit.
- Le travail est récupéré dans les deux turbines : « haute pression » ($w_{BC'}$) et « basse pression » ($w_{B'C''}$).
- Appliquons le premier principe industriel à l'eau sur la transformation B → C' dans la turbine « haute pression » :

$$h_{C'} - h_B = w_{BC'}.$$

Par lecture graphique, il vient $w_{BC'} = 2,44 \cdot 10^3 - 2788,46 = -350 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

- Appliquons le premier principe industriel à l'eau sur la transformation B' → C'' dans la turbine « basse pression » :

$$h_{C''} - h_{B'} = w_{B'C''}.$$

Par lecture graphique, il vient $w_{B'C''} = 2,00 \cdot 10^3 - 2,78 \cdot 10^3 = -780 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

- Le transfert thermique échangé avec la source chaude est reçu par le fluide lors des transformations A → A', A' → B et C' → B'. Entre A et B, le cycle est inchangé par la surchauffe donc, d'après les questions précédentes, $q_{AA'} = 1,00 \cdot 10^3 \text{ kJ.kg}^{-1}$ et $q_{A'B} = 1598,36 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Appliquons le premier principe industriel à l'eau sur la transformation C' → B' dans le surchauffeur où il n'y a pas de pièces mobiles ($w_{C'B'} = 0$) :

$$h_{B'} - h_{C'} = q_{C'B'}.$$

Par lecture graphique, il vient $q_{C'B'} = 2,78 \cdot 10^3 - 2,44 \cdot 10^3 = 340 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

- On en déduit le rendement du cycle de Rankine avec surchauffe :

$$\rho_{R,s} = \frac{-(w_{BC'} + w_{B'C''})}{q_{AA'} + q_{A'B} + q_{C'B'}} = 0,38.$$

On retrouve un rendement similaire au rendement du cycle de Rankine (aux erreurs de lectures graphiques près). Le cycle avec surchauffe nécessite donc un plus grand nombre d'organes mais limite les problèmes de corrosion.

Remarque

Il est très probable que le rendement réel du cycle avec surchauffe soit inférieur à celui du cycle de Rankine simple car le cycle avec surchauffe nécessite un plus grand nombre d'organes et donc risque d'introduire de nouvelles sources d'irréversibilité.