

DM29 • Turbine à vapeur

Dans la machine qualifiée de turbine à vapeur on fait décrire à l'eau le cycle suivant :

- l'eau **liquide** introduite dans une pompe subit une compression isentropique de P_1 à P_2 , depuis l'état initial $A\{P_1 = 0,07 \text{ bar}; T_1 = 308 \text{ K}\}$ sur la courbe de saturation jusqu'à l'état final $B\{P_2 = 20,0 \text{ bar}; T_B\}$
- l'eau **liquide** est soumise ensuite, dans la chaudière, à un chauffage isobare qui l'amène sur la courbe d'ébullition ($B \rightarrow B'\{P_2, T_2 = 485 \text{ K}\}$) puis à une vaporisation totale ($B' \rightarrow C\{P_2, T_2\}$) à la température T_2 .
- la **vapeur** « saturante sèche » subit alors une détente isentropique de P_2 à P_1 dans la turbine ($C \rightarrow D$), la température finale est T_1 .
- la **vapeur saturante** (liquide+gaz) ainsi obtenue passe dans un condenseur qui la transforme dans les conditions $\{P_1, T_1\}$ à l'état de liquide ($D \rightarrow A$).

On raisonne sur l'unité de masse d'eau décrivant un cycle et l'on donne les caractéristiques suivantes pour ce fluide **pour l'équilibre liquide-vapeur** :

P (bar)	T (K)	Liquide		Vapeur	
		s_L (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	h_L (kJ.kg ⁻¹)	s_V (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	h_V (kJ.kg ⁻¹)
0,07	308	0,53	148	8,30	2 563
20,0	485	2,45	910	6,35	2 801

- 1) Représenter (avec les justifications nécessaires) la courbe de saturation et le cycle $ABB'CDA$:
 - a) dans le diagramme de CLAPEYRON (P, v)
 - b) puis dans le diagramme entropique (T, s).

Rq : Parmi ces justifications, répondre aux questions : la vaporisation totale $B' \rightarrow C$ se fait à quelle pression ? Le point C est où par rapport à la courbe de rosée (à gauche, à droite, sur la courbe) ? L'isentropique CD est comment par rapport à la courbe de rosée ? . . .

- 2) Calculer le titre massique de la vapeur $x_{V,D}$ à la sortie de la turbine.

Rép : $x_{V,D} = 0,75$.

- 3) Déterminer, grâce au tableau, l'enthalpie massique du fluide dans les états A et B pour lesquels on suppose $h_B \simeq h_A$, puis pour les états C et D .

→ en déduire les transferts thermiques massiques reçu par le fluide au contact de la chaudière (q_1) et du condenseur (q_2).

- 4) On rappelle qu'à la traversée d'une partie active (compresseur, turbine, chaudière ou condenseur) le premier principe appliqué au fluide circulant en régime permanent vérifie :

$$\Delta h = h_s - h_e = w^* + q$$

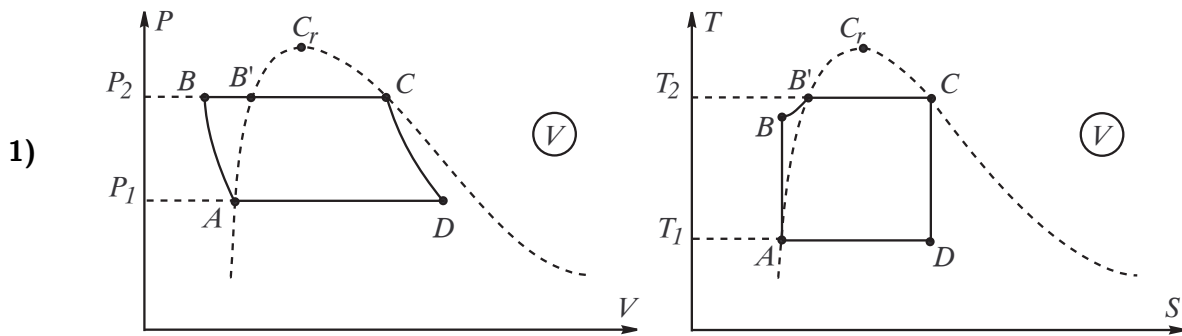
avec : h_e et h_s les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie, w^* et q étant le travail et la chaleur massiques **utiles** (c'est-à-dire échangés avec l'extérieur du circuit à l'exclusion du travail des forces de pression) reçus par le fluide à la traversée de la partie active.

→ Calculer le travail reçu par le fluide à la traversée de la turbine w^* .

Commenter son signe.

- 5) Calculer le rendement de cette machine (turbine à vapeur) défini par $\eta = \left| \frac{w^*}{q_1} \right|$.

Solution



2) Dans l'état D le corps pur est diphasé (phase liquide L et phase vapeur V) ; son entropie massique est donc :

$$s(D) = x_{V,D} s_V(D) + x_{L,D} s_L(D) = x_{V,D} s_V(T_1) + (1 - x_{V,D}) s_L(T_1), \text{ soit :}$$

$$x_{V,D} = \frac{s(D) - s_L(T_1)}{s_V(T_1) - s_L(T_1)}$$

Or, parce que la transformation CD est une isentropique, on a $s(D) = s(C)$.

Or, C correspond à la vapeur sèche limite (C sur la courbe de rosée ; l'énoncé parle de « vapeur saturante sèche » au point C), donc : $s(C) = s_V(T_2)$. Finalement :

$$x_{V,D} = \frac{s_V(T_2) - s_L(T_1)}{s_V(T_1) - s_L(T_1)} \Rightarrow \text{AN : } x_{V,D} = \frac{6,35 - 0,53}{8,30 - 0,53} = 0,75$$

3) • Puisque A est sur la courbe d'ébullition : $h(B) \simeq h(A) = h_L(T_1) = 148 \text{ kJ.kg}^{-1}$

• De plus, C étant sur le courbe de rosée : $h(C) = h_V(T_2) = 2801 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

• Un raisonnement similaire au début de 2) conduit à :

$$h(D) = x_{V,D} h_V(T_1) + (1 - x_{V,D}) h_L(T_1) = 1959 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

• Comme les transformations BC et DA sont isobares, on en déduit :

$$q_1 = q_{BC,P} = \Delta h_{BC} = h(C) - h(B) = 2653 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$q_2 = q_{DA,P} = \Delta h_{DA} = h(A) - h(D) = -1811 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

4) Travail reçu algébriquement par le fluide traversant la turbine (transformation isentropique, donc adiabatique, donc $q = 0$) :

$$w^* = \Delta h_{CD} - q = h(D) - h(C) = -q_2 - q_1 = -842 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

• Son signe négatif signifie que c'est le fluide qui fournit en réalité un travail à la turbine.

5)

$$\eta = \frac{-w^*}{q_1} = 0,32$$