

Conversion d'énergie

Midterm 2017

Correction

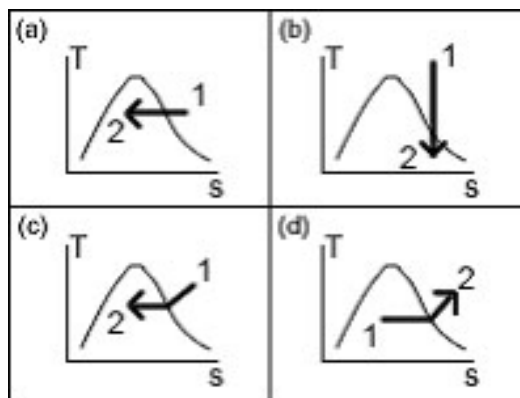
October 24, 2017

1. Lequel des énoncés suivants sur la propriété thermodynamique de la température est correct?
 - A. Sa définition est basée sur le principe zéro de la thermodynamique et c'est une quantité intensive.
 - B. Sa définition est basée sur le premier principe de la thermodynamique et c'est une quantité intensive.
 - C. Sa définition est basée sur le principe zéro de la thermodynamique et c'est une quantité extensive.
 - D. Sa définition est basée sur le deuxième principe de la thermodynamique et c'est une quantité intensive.

La réponse est A.

2. Se référer à la Figure ci-dessous. Quel diagramme d'état T-s représente correctement le processus de **refroidissement isobare** survenant dans un échangeur de chaleur?

- A. c.
- B. b.
- C. a.
- D. d.



La réponse est A.

3. En utilisant le diagramme T-s de l'eau (Figure 1), laquelle de ces expressions est vraie pour un fluide à 200°C et 10 bar?
 - A. la vapeur est surchauffée, $s \simeq 6.5 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.
 - B. la vapeur est surchauffée, $h \simeq 2880 \text{ kJ/kg}$.

- C. la vapeur est saturée, $h \simeq 2880 \text{ kJ/kg}$.
- D. la vapeur est saturée, $s \simeq 6.5 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$.

La réponse est A. Toutefois, $h=2830 \text{ kJ/kg}$ donc aussi la réponse B est considérée correcte.

4. Le cycle idéal de Brayton consiste en:

- A. deux isobares et deux isentropiques.
- B. deux isothermes et deux isobares.
- C. deux isochores et deux isentropiques.
- D. deux isothermes et deux isochores.

La réponse est A.

5. L'air, $c_p = 1.005 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$, $R = 287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, est chauffé de 25°C à 340°C sans échange de travail. Que vaut l'énergie interne spécifique de l'air suite à ce chauffage?

- A. 226.2 kJ/kg .
- B. 316.5 kJ/kg .
- C. 226.2 J/kg .
- D. Aucune de ces réponses.

La réponse est A. Pour un gas idéal $du = c_v dT$ et $c_v = c_p - R$.

6. La différence entre les flux des moments de la quantité de mouvement à l'entrée et à la sortie d'une turbine hydraulique correspond:

- A. au couple généré par cette turbine.
- B. au couple résistif produit par cette turbine.
- C. au travail transmis du fluide aux pâles de la turbine.
- D. aucune de ces réponses.

La réponse est A.

7. Dans le distributeur de la turbine hydraulique:

- A. la différence de la hauteur piézométrique est transformée complètement en énergie cinétique si la turbine est à action.
- B. la différence de la hauteur piézométrique est transformée complètement en énergie cinétique si la turbine est à réaction.
- C. la différence de la hauteur piézométrique est transformée complètement en énergie gravitationnelle si la turbine est à action.
- D. la différence de la hauteur piézométrique est transformée complètement en énergie gravitationnelle si la turbine est à réaction.

La réponse est A.

8. Pour une turbine hydraulique la vitesse de fuite correspond a:

- A. la vitesse de rotation pour laquelle le rendement mécanique de la turbine hydraulique est nul.
- B. la vitesse de rotation pour laquelle le rendement mécanique de la turbine hydraulique est maximal.
- C. la vitesse du fluide pour laquelle la puissance de la turbine hydraulique est nul.
- D. aucune de ces réponses.

La réponse est A.

9. Une turbine hydraulique a une vitesse de rotation $n = 360$ tr/min. L'eau entre dans la roue, à $R_1 = 0.6$ m, avec une vitesse absolue $c_{u1} = 12$ m/s et sort de la turbine à $R_2 = 0.3$ m. Quel est le travail par unité de masse si $c_{u2} = 0.5$ m/s?

A. 265.8 J/kg.
B. 0 J/kg.
C. 7.05 J/kg.
D. 2538 J/kg.

La réponse est A.

10. La limite de Lanchester-Betz est:

A. égale à 0.593.
B. la valeur maximale du coefficient de poussée.
C. due aux pertes engendrées par l'éolienne.
D. égale à $1/3$.

La réponse est A.

11. Une éolienne a des pales longues 70 m. La vitesse du vent dans une section très en amont par rapport au disque actuateur est $U_\infty = 9$ m/s. La densité de l'air est de 1.205 kg/m³. Quelle est la valeur maximale de puissance qu'on peut extraire du vent?

A. 4.01 MW.
B. 21.93 kW.
C. 1.89 MW.
D. 2.07 MW.

La réponse est A.

12. Le coefficient de puissance d'une éolienne:

A. est le rapport entre la puissance extraite du vent et celle présente dans le streamtube.
B. est égal à 1 dans le cas idéal.
C. est proportionnel au cube de la vitesse du vent.
D. aucune des réponses précédentes.

La réponse est A.

13. Une éolienne est caractérisée par un facteur d'induction axiale $a = 0.4$, et la vitesse du vent en amont du disque actuateur est $U_\infty = 9$ m/s. On définit la vitesse du vent en correspondance du disque U_D et la vitesse aval U_w . On a que:

A. $U_d = 5.4$ m/s et $U_w = 1.8$ m/s.
B. $U_d = 1.8$ m/s et $U_w = 5.4$ m/s.
C. $U_d = 5.4$ m/s et $U_w = 5.4$ m/s.
D. $U_d = 9$ m/s et $U_w = 1.8$ m/s.

La réponse est A.

14. En traversant le rotor d'une éolienne, l'air:

A. gagne un moment angulaire à cause du couple exercée par le rotor.
B. acquiert une vitesse tangentielle à la rotation et dans la même direction du rotor.
C. acquiert une vitesse axiale égale à $2a'\Omega r$.

D. acquiert une vitesse axiale dans la direction opposée à celle du rotor.

La réponse est A.

15. Laquelle des réponses suivantes est fausse. En présence d'une turbine éolienne l'air:

A. exerce une force sur le rotor proportionnelle au cube de sa vitesse.

B. perd de la vitesse axiale.

C. a un brusque changement de pression.

D. acquiert une vitesse tangentielle.

La réponse est A.

Conversion d'énergie

Midterm 2017

Correction

October 25, 2017

1 Exercice: Cycle de Rankine (1.5 points)

Dans un cycle d'eau standard idéal de Rankine, on prend comme point 1 l'état en aval de la chaudière, comme point 2 l'état en aval de la turbine, et comme points 3 et 4 les états avant et après la pompe respectivement. Pour ces conditions:

1. Dessiner les principales unités du système.
2. Dessiner le cycle sur un diagramme T-s.
3. Calculer s_2 et h_2 (entropie spécifique et enthalpie spécifique) à la sortie de la turbine.
4. Calculer s_4 et h_4 (entropie spécifique et enthalpie spécifique) à la sortie de la pompe.
5. Calculer les puissances-travail et les puissances-chaleur mises en jeu au cours de chaque transformation.
6. Calculer l'efficacité motrice du cycle.

Données

- La vapeur d'eau saturée à l'entrée de la turbine a une pression $p_1=80$ bar, une enthalpie spécifique $h_1= 2758$ kJ/kg, et une entropie spécifique $s_1=5.7432$ kJ/kg · K.
- Le liquide saturé à la sortie du condenseur a une pression $p_3= 0.008$ MPa. L'entropie spécifique du liquide saturé à cette pression est $s_3=0.5926$ kJ/kg · K et l'entropie spécifique de la vapeur saturée est $s_v= 8.2274$ kJ/kg · K.
L'enthalpie spécifique du liquide saturé à cette pression est $h_3= 173.88$ kJ/kg et celle de la vapeur saturée est $h_v= 2576.23$ kJ/kg.
- Le volume spécifique du liquide est $v_3= 1.0084 * 10^{-3}$ m³/kg.
- Le débit-masse d'eau est $3.77 * 10^5$ kg/h.

- Le titre x est calculé pour une propriété spécifique y comme:

$$x = \frac{y - y_L}{y_v - y_L}$$

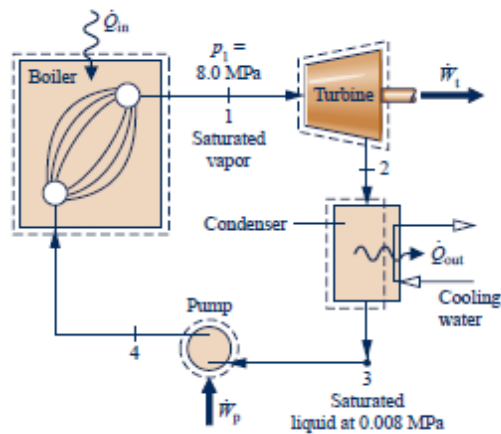
où y_L est la propriété spécifique à l'état du liquide saturé et y_v est la propriété spécifique à l'état de vapeur saturée.

Hypothèses

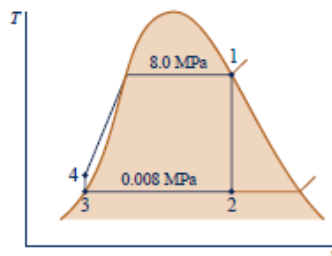
- les variations des énergies cinétique et potentielle sont négligeables;
- la compression et la détente sont adiabates;
- la dissipation est négligeables.

Solution

1. Principales unités du système:



2. Diagramme T-s:



3. La transformation 1-2 est isentropique, donc $s_2 = s_1 = 5.7432 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

De la définition du titre:

$$x = \frac{s_2 - s_3}{s_v - s_3} = \frac{5.7432 - 0.5926}{8.2274 - 0.5926} = 0.674.$$

Nous appliquons la même définition du titre à l'enthalpie spécifique:

$$h_2 = h_3 + x \cdot (h_v - h_3) = 173.88 + 0.674 \cdot (2576.23 - 173.88) = 1793 \text{ kJ/kg}.$$

4. La transformation 3-4 est isentropique, donc $s_4 = s_3 = 0.5926 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

Le travail spécifique de la pompe est:

$$w_p = (h_4 - h_3) = v_3 \cdot (p_4 - p_3)$$

Donc,

$$h_4 = h_3 + v_3 \cdot (p_4 - p_3) = 173.88 + 1.0084 \cdot 10^{-3} (8 - 0.008) \cdot 10^3 = 181.94 \text{ kJ/kg}.$$

5. La transformation 1-2 est une transformation adiabate, donc la puissance-chaaleur est nulle, $Q_{12} = 0$; La puissance-travail est donnée par:

$$W_T = W_{12} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) = 3.77 \cdot 10^5 / 3600 \cdot (2758 - 1793) = 101 \text{ MW}.$$

La transformation 2-3 est une transformation avec puissance-travail nulle, $W_{23} = 0$; La puissance-chaaleur est donnée par :

$$Q_{23} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) = 3.77 \cdot 10^5 / 3600 \cdot (1793 - 173.88) = 169.5 \text{ MW}.$$

La transformation 3-4 est une transformation adiabate, donc la puissance-chaaleur est nulle, $Q_{34} = 0$; La puissance-travail est donnée par:

$$W_P = W_{34} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3) = 3.77 \cdot 10^5 / 3600 \cdot (181.94 - 173.88) = 844 \text{ kW}.$$

La transformation 1-4 est une transformation avec puissance-travail nulle, $W_{14} = 0$. La puissance-chaaleur est donnée par:

$$Q_{14} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) = 3.77 \cdot 10^5 / 3600 \cdot (2758 - 181.94) = 270 \text{ MW}$$

6. L'efficacité motrice du cycle est, en considérant le bilan net d'énergie-travail du cycle:

$$\eta = \frac{W_T - W_P}{Q_{14}} = \frac{101 - 0.844}{270} = 37\%.$$

2 Exercice: Turbines éoliennes (1.5 points)

On veut construire un parc éolien capable de produire une puissance maximale de 25 MW. Le parc sera constitué de 12 éoliennes installées sur une ligne perpendiculaire à la direction du vent. La vitesse maximale du vent $U_{\infty, max}$ dans cette région est de 12 m/s.

1. Quel est le rayon des turbines nécessaire pour produire une telle puissance en conditions optimales (vitesse du vent maximale et coefficient de puissance maximale donnée par la Table 1)?
2. À quelle vitesse angulaire devraient tourner les turbines, pour obtenir la puissance maximale, pour $U_{\infty, max}$? Et pour un vent de 6 m/s?
3. Pour $U_{\infty, max}$, la vitesse axiale du vent en correspondance de la turbine, U_D , est de 7.2 m/s. Donner:
 - la vitesse axiale du vent en aval de la turbine (U_w);
 - la vitesse tangentielle en aval de la turbine et à l'extrémité des pales ($U_{tan, R}$) (considérer le tip-speed ratio optimale);
 - la vitesse tangentielle en aval de la turbine et à 10 metres du centre du rotor ($U_{tan, 10m}$) (considérer le tip-speed ratio optimale);

Données

- La densité de l'air est de 1.205 kg/m^3 .
- la relation entre C_P et λ est définie par la table suivante:

Table 1: Relation entre C_P et λ

λ	C_P	λ	C_P	λ	C_P
1	0,045	6	0,509	10	0,492
2	0,087	6,5	0,523	11	0,463
3	0,183	7	0,530	12	0,419
3,5	0,290	7,5	0,534	13	0,364
4	0,347	8	0,528	14	0,285
4,5	0,392	8,5	0,522	15	0,202
5	0,447	9	0,515		
5,5	0,490	9,5	0,507		

- Les facteurs d'induction axiale et tangentielle sont liés par:

$$a' = \frac{a(1-a)}{\lambda} \quad (1)$$

Solution

1. On trouve la puissance maximale de chaque turbine:

$$P_T = P_{tot}/n_{turbines} = 25/12 = 2.08 \text{ MW} \quad (2)$$

On sait que la puissance qu'une turbine peut produire est donnée par la formule:

$$P_T = \frac{1}{2} C_p \rho A_d U_\infty^3$$

On utilise la relation $A_d = \pi R^2$ et la valeur maximale du coefficient de puissance trouvée dans la Table 1, $C_p = 0.534$. Le rayon des turbines est donné par:

$$R = \sqrt{\frac{P_T}{\frac{1}{2} \rho C_p \pi U_\infty^3}} = \sqrt{\frac{2.08 \text{ MW}}{\frac{1}{2} \cdot 1.205 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.534 \cdot \pi \cdot (12 \text{ m/s})^3}} = 34.5 \text{ m}$$

2. La vitesse de rotation de la turbine est donnée par la formule:

$$\Omega = \frac{\lambda U_\infty}{R}$$

et on a la puissance maximale quand le coefficient de puissance C_p est maximale. Dans la Table 1, on voit que cette condition est vérifiée quand le tip-speed ratio est égal à $\lambda = 7.5$. On a donc:

$$\begin{aligned} \Omega = \frac{\lambda_{max} U_\infty}{R} &= \frac{7.5 \cdot 12 \text{ m/s}}{34.5 \text{ m}} = 2.6 \text{ rad/s} && \text{for } U_\infty = 12 \text{ m/s} \\ &= \frac{7.5 \cdot 6 \text{ m/s}}{34.5 \text{ m}} = 1.3 \text{ rad/s} && \text{for } U_\infty = 6 \text{ m/s} \end{aligned}$$

3. On peut trouver la valeur du facteur d'induction de flux axial a , grâce au fait que on connaît les vitesses U_∞ et U_D , liées par la formule $U_D = U_\infty(1 - a)$. On a que:

$$a = 1 - \frac{U_D}{U_\infty} = 1 - \frac{7.2 \text{ m/s}}{12 \text{ m/s}} = 0.4$$

La vitesse axiale du vent en aval de la turbine U_W est donc:

$$U_W = U_\infty (1 - 2a) = 12 \text{ m/s} (1 - 2 \cdot 0.4) = 2.4 \text{ m/s}$$

On trouve la valeur de a' en utilisant la valeur maximale du tip-speed ratio $\lambda_{max} = 7.5$ et par la formule suivante.

$$a' = \frac{a(1 - a)}{\lambda_{max}} = \frac{0.4 \cdot (1 - 0.4)}{7.5} = 0.032$$

Les vitesses tangentielles en aval de la turbine à l'extrémité des pales et à 10 m du centre du rotor sont données respectivement par:

$$\begin{aligned} U_{tan} &= 2a'\Omega R = 2 \cdot 0.032 \cdot 2.6 \text{ rad/s} \cdot 34.5 \text{ m} = 5.76 \text{ m/s} \text{ à l'extrémité des pales} \\ &= 2 \cdot 0.032 \cdot 2.6 \text{ rad/s} \cdot 10 \text{ m} = 1.67 \text{ m/s} \text{ à 10 m du centre du rotor} \end{aligned}$$