

Cours de Conversion d'énergie, 5^e semestre bachelor
Examen du 18.10.2019, partie I

Questions

2 points à disposition en totale pour cette partie

Pour chaque question il y a exactement une réponse correcte.

Si vous avez choisi :

- la seule réponse correcte → +0.2 points;
- une seule réponse incorrecte → -0.06 points;
- 0 ou plus d'une réponse → 0 points.

←Vous encodez votre numéro de SCIPER ici et écrivez votre nom complet dans la case ci-dessous ↓

☐0 ☐0 ☐0 ☐0 ☐0 ☐0
☐1 ☐1 ☐1 ☐1 ☐1 ☐1
☐2 ☐2 ☐2 ☐2 ☐2 ☐2
☐3 ☐3 ☐3 ☐3 ☐3 ☐3
☐4 ☐4 ☐4 ☐4 ☐4 ☐4
☐5 ☐5 ☐5 ☐5 ☐5 ☐5
☐6 ☐6 ☐6 ☐6 ☐6 ☐6
☐7 ☐7 ☐7 ☐7 ☐7 ☐7
☐8 ☐8 ☐8 ☐8 ☐8 ☐8
☐9 ☐9 ☐9 ☐9 ☐9 ☐9

Nom et prénom :

.....

Question 1 – Quelle est la définition de la capacité thermique à pression constante c_p ?

- ☐ La quantité d'énergie qu'il faut fournir à un corps pour élever d'un degré la température de l'unité de masse de ce corps à volume constant.
- X La quantité d'énergie qu'il faut fournir à un corps pour élever d'un degré la température de l'unité de masse de ce corps à pression constante.
- ☐ La quantité d'énergie qu'il faut fournir à un corps pour élever d'un degré la température de l'unité de masse de ce corps à enthalpie constante.
- ☐ La quantité d'énergie qu'il faut fournir à un corps pour élever d'un degré la température de l'unité de masse de ce corps à énergie interne constante.

Question 2 – Dans une transformation adiabatique d'un système thermodynamique, on a que :

- ☐ L'accroissement d'énergie interne est positif si le travail reçu par le système est négatif.
- X L'accroissement d'énergie interne est égal au travail reçu par le système.
- ☐ La transformation n'implique aucun échange de travail.
- ☐ La quantité de chaleur échangé est toujours positive.

Question 3 – La différence entre les taux des moments de la quantité de mouvement à l'entrée et à la sortie d'une turbine hydraulique correspond :

- ☐ A la chaleur transmise à l'air par la turbine
- ☐ Au travail transmis par l'air aux à la turbine
- X Au couple généré par la turbine
- ☐ A la force appliquée par l'air sur le disque actuateur de la turbine

Question 4 – Si la vitesse absolue a à l'entrée d'une turbine hydraulique est 18 m/s et le travail maximum est de 300 J/kg, le grade de réaction est égal à:

- ☐ 0.54
- ☐ 0
- ☐ 0.56
- X 0.46

Question 5 – La limite de Lanchester-Betz est :

- ☐ Un paramètre de design d'une turbine éolienne
- ☐ La valeur maximale de la force de poussée appliqué sur le disque actuateur
- ☐ La puissance maximale extraite par la turbine éolienne
- X La valeur maximale (i.e. limite) du rendement d'une turbine éolienne à axe horizontale par rapport à l'énergie cinétique contenue dans le 'streamtube'

Question 7 – L'équation de Gibbs permet de :

- X Calculer les quantités de travail et chaleur dans les transformations thermodynamiques respectivement adiabatique et sans-travail à travers les variations d'enthalpie du système.
- ☐ Calculer toujours les quantités de chaleur échangée par le système.
- ☐ Calculer toujours les quantités de travail échangé par le système.
- ☐ Calculer le rendement thermodynamique du système.

Question 8 – Dans un cycle de Rankine, une turbine génère 500 MW de travail (en sortie du système). Le condensateur cède 700 MW à la source froide. Quelle est la puissance donnée par la source chaude ?

- ☐ 500 MW
- ☐ 700 MW
- X 1200 MW
- ☐ 200 MW

Question 9 – Dans le distributeur d'une turbine hydraulique on a que :

- X La hauteur piézométrique est transformée entièrement en énergie cinétique si la turbine est à action.
- ☐ La hauteur piézométrique est transformée complètement en énergie cinétique si la turbine est à réaction.
- ☐ La hauteur piézométrique est transformée entièrement en énergie gravitationnelle si la turbine est à action.
- ☐ La chute utile est transformée complètement en énergie gravitationnelle si la turbine est à réaction.

Question 10 – En utilisant le diagramme T - s de l'eau de la Figure 1, quelle est l'état pour de l'eau avec une enthalpie massique (courbes rouges) de 2000 kJ/kg et une température de 200 °C ?

- ☐ Vapeur surchauffée avec une entropie massique $s = 7.2 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{K})$
- X Vapeur saturée avec une entropie massique $s = 4.8 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{K})$
- ☐ Vapeur saturée avec une entropie massique $s = 7.2 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{K})$
- ☐ Vapeur surchauffée avec une entropie massique $s = 4.8 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{K})$

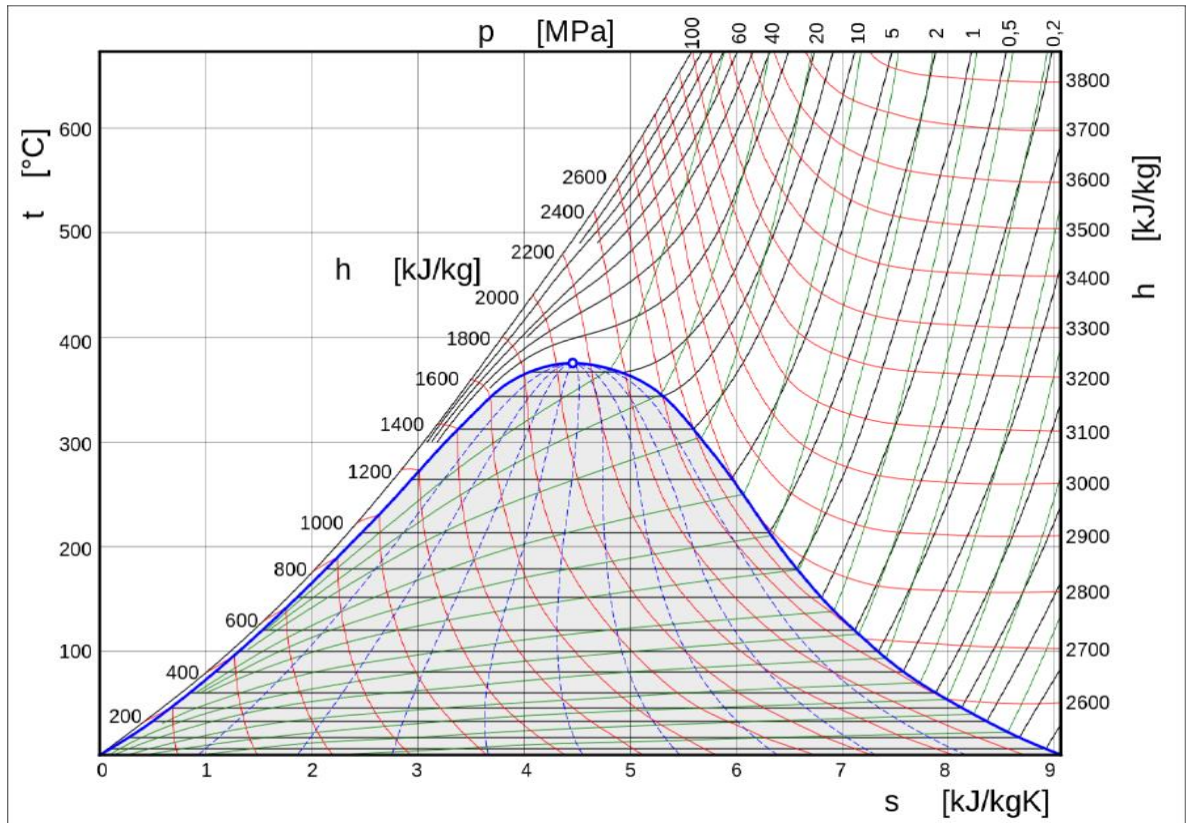


Figure 1. Diagramme $T-s$ de l'eau

Exercice #1 (2 points)

Une centrale électrique utilise un cycle de Brayton pour produire de l'électricité. On a que la puissance électrique générée (i.e. travail net du cycle) est de 10 MW. Le rendement est mesuré par le système de supervision de la centrale et égal à 31.5%.

La pression à l'entrée du compresseur est de 1 bar avec une température de 310°K et la pression de sortie du compresseur est de 6 bars. La température de sortie de la turbine est de 810°K.

Hypothèses

- l'air et les gaz de combustion (i.e. avant et après la chambre de combustion) sont assimilables à des gaz parfaits ;
- le rendement de la génératrice électrique connectée à la turbine-compresseur de la centrale est unitaire ;
- les variations des énergies cinétique et potentielle sont négligeables;
- les transformations thermodynamiques dans la turbine et dans le compresseur sont isentropiques; par conséquent, on a que les états thermodynamiques #1 et #2 $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^\Gamma$, ou le facteur calorifique de l'air $\Gamma = 0.2857$; donc, on peut calculer les puissances-travaux de la turbine et du compresseur à travers les variation d'enthalpie : ${}^b_a\dot{W} = \dot{m}c_p(T_a - T_b)$;
- la capacité thermique à pression constante de l'air $c_p = 1.0087 \frac{kJ}{kg^\circ K}$;
- la transformation thermodynamique dans la chambre de combustion est isobare.

Questions

- Dessiner un schéma avec les connections entre les machines, indiquer les états en entrée et sortie de chaque machine tracer le cycle sur le diagramme $T-s$ (i.e. température – entropie massique).
- Calculer la puissance-chaleur donnée par la chambre de combustion au cycle.
- Calculer la puissance-chaleur donnée par les gaz de sortie de la turbine à l'atmosphère.
- Déterminer les températures à la sortie du compresseur et à l'entrée de la turbine.
- Calculer le débit massique de l'air du cycle.

Solution

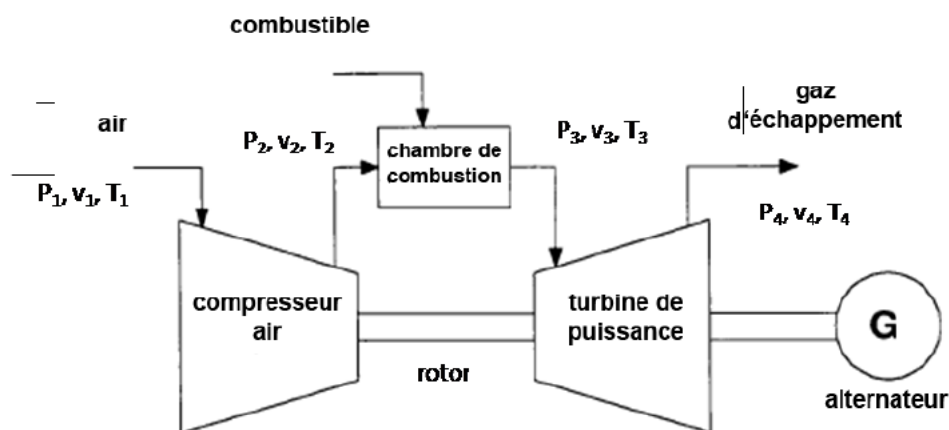


Fig. 1 – Machines et leur connections dans le cycle de Brayton.

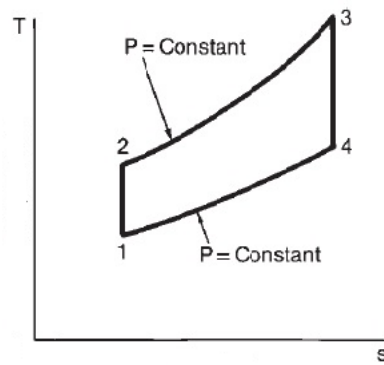


Fig. 2 – Cycle de Brayton sur le diagramme T - s

A travers la définition de rendement d'un cycle thermodynamique, on peut directement déterminer la puissance-chaleur donnée par la chambre de combustion, $\dot{Q}_c^+$

$$\eta = \frac{\dot{W}_t^- - \dot{W}_c^+}{\dot{Q}_c^+} = \frac{\dot{W}_{net}^-}{\dot{Q}_c^+}$$

$$\dot{Q}_c^+ = \frac{\dot{W}_{net}^-}{\eta} = \frac{10MW}{0.315} = 31.75MW$$

Pour déterminer la puissance-chaleur donnée à l'atmosphère par la centrale, on peut directement appliquer le premier principe de la thermodynamique au système entier représenté par la centrale. On a que :

$$\dot{W}_c^+ - \dot{W}_t^- + \dot{Q}_c^+ - \dot{Q}_{atm}^- = 0$$

$$\dot{Q}_{atm}^- = \dot{W}_c^+ - \dot{W}_t^- + \dot{Q}_c^+ = -\dot{W}_{net}^- + \dot{Q}_c^+ = -10MW + 31.75kW = 21.75MW$$

On peut calculer la température à la sortie du compresseur :

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^\Gamma = 310^\circ K \left(\frac{6bar}{1bar} \right)^{0.2857} = 517.2^\circ K$$

Et, aussi, la température d'entrée de la turbine :

$$T_3 = T_4 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{-\Gamma} = 810^\circ K \left(\frac{1bar}{6bar} \right)^{-0.2857} = 1351.5^\circ K$$

On peut écrire les puissances-travaux de la turbine et du compresseur à travers les équations suivantes :

$$\dot{W}_t^- = \dot{m}c_p(T_3 - T_4)$$

$$\dot{W}_c^+ = \dot{m}c_p(T_2 - T_1)$$

Donc :

$$\dot{W}_t^- - \dot{W}_c^+ = \dot{W}_{net}^- = \dot{m}c_p(T_3 - T_4 - T_2 + T_1)$$

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \frac{\dot{W}_{net}^-}{c_p(T_3 - T_4 - T_2 + T_1)} = \frac{10000kW}{1.0087 \frac{kJ}{kg^\circ K} (1351.5^\circ K - 810^\circ K - 517.2^\circ K + 310^\circ K)} = \\ &= 29.66 \frac{kg}{s}\end{aligned}$$

Exercice #2 (1 points)

Une centrale électrique utilise une turbine hydraulique à réaction avec un grade de réaction de 0.4. La puissance électrique générée est de 1.1 MW et le débit volumétrique d'eau est de 3.4 m³/s.

Hypothèses

- La densité volumétrique de l'eau est de $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.
- Le rendement de la génératrice électrique connectée à la turbine de la centrale est unitaire.
- Le degré de réaction d'une turbine hydraulique est $\chi = \frac{w_{i(\text{obt})} - \frac{c_1^2}{2}}{w_{i(\text{obt})}}$, où la c_1 est la vitesse absolue de l'eau dans la section d'entrée de la rue.

Questions

- Dessiner la structure du distributeur et de la rue de la machine ainsi que les triangles de vitesses dans les sections d'entrée et sortie de la rue de la turbine. Il est aussi demandé d'indiquer le sens de rotation de la rue.
- Déterminer le travail obtenu par unité de masse, $w_{i(\text{obt})}$.
- Déterminer la vitesse absolue de l'eau dans la section d'entrée de la rue, c_1 .

Solution

La structure du distributeur et de la rue de la machine sont indiqués dans la figure suivante avec le sens de rotation de la rue.

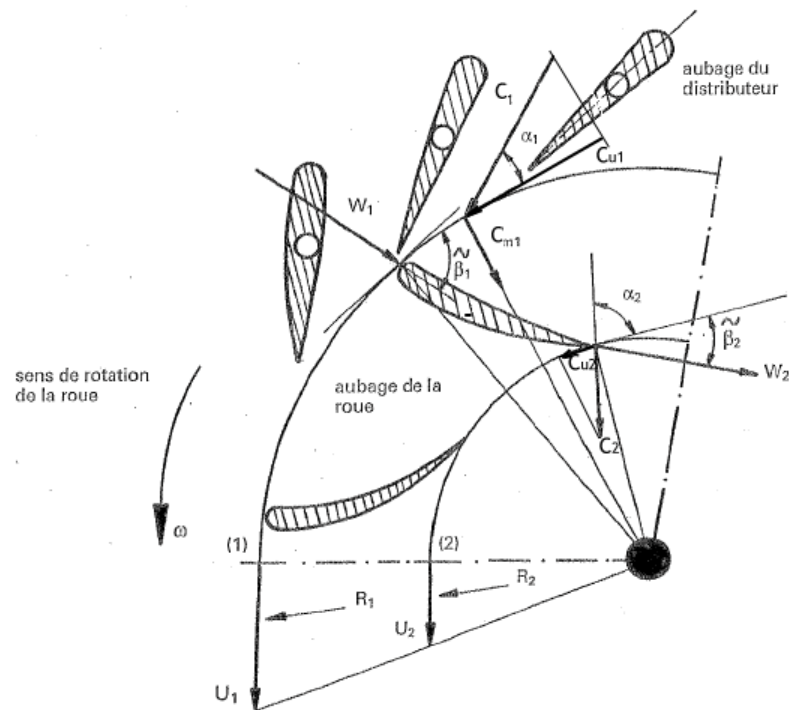


Fig. 3 – Structure du distributeur et de la rue de la machine, triangles de vitesses et sens de rotation de la rue.

Pour déterminer le travail obtenu par unité de masse, $\mathbf{w}_{i(obt)}$, on peut simplement utiliser la connaissance de la puissance générée par la centrale et le débit volumétrique de l'eau.

$$P_g = \mathbf{w}_{i(obt)} \varrho \dot{v}$$

$$\mathbf{w}_{i(obt)} = \frac{P_g}{\varrho \dot{v}} = \frac{1.1 \cdot 10^6 W}{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 3.4 \frac{m^3}{s}} = 323.5 \frac{J}{kg}$$

A travers la définition du degré de réaction de la machine, on peut directement déterminer la vitesse absolue de l'eau dans la section d'entrée de la rue :

$$\chi = \frac{\mathbf{w}_{i(obt)} - \frac{c_1^2}{2}}{\mathbf{w}_{i(obt)}}$$

$$c_1 = \sqrt{2 \mathbf{w}_{i(obt)} (1 - \chi)} = \sqrt{2 \cdot 323.5 \frac{J}{kg} (1 - 0.4)} = 19.7 \frac{m}{s}$$