

Exercices chapitre 9

Version du 24 décembre 2014

CC-BY-SA Olivier Cleynen — thermo.ariadacapo.net

Les propriétés de l'eau sont toutes tabulées dans les abaques n°1, 2 et 3.

L'air est considéré comme un gaz parfait.

$$c_{v(\text{air})} = 718 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad R_{\text{air}} = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$c_{p(\text{air})} = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad \gamma_{\text{air}} = 1,4$$

9.1 Cycle de Rankine

La centrale EDF de Porcheville (figure 9.22), en bordure de l'A13 à Mantes-la-Jolie, reçoit de la chaleur issue de la combustion de fioul, et utilise un cycle à vapeur pour alimenter une génératrice électrique.

Dans la centrale l'eau évolue entre les pressions de 0,1 bar et 140 bar. La vapeur atteint 545 °C, et les turbines ont une efficacité isentropique de 80 %.

Dans cet exercice, nous considérons que le cycle est basé sur un cycle de Rankine surchauffé.

1. Schématisez le circuit physique de l'eau dans la centrale ; tracez le cycle suivi sur un diagramme température-entropie.
2. Quelle est l'enthalpie spécifique de l'eau à la sortie de la turbine ?
3. Quelle est l'enthalpie spécifique de l'eau à la sortie des pompes ?
4. Quel est le rendement thermodynamique de l'installation ?
5. Quelle est la consommation spécifique de l'installation, c'est-à-dire la masse de vapeur ayant traversé la turbine lorsque l'installation a généré 1 kWh d'énergie mécanique ?



FIGURE 9.22 – Centrale électrique de Porcheville, alimentée au charbon jusqu'en 1987 et fonctionnant désormais au fioul. Elle sert principalement les demandes de pointe.

Photo schéma CC-0 o.c.

6. Quel débit horaire de vapeur faut-il faire circuler dans le circuit pour obtenir une puissance mécanique de 60 MW ?

9.2 Chaudière de centrale à vapeur

Dans une centrale à vapeur, la chaudière fonctionne avec la combustion de bois dans de l'air prélevé dans l'atmosphère. Les briquettes utilisées pour la combustion sont faites de résidus de bois et de biomasse (figure 9.23) ; elles ont une capacité calorifique massique de 15 MJ kg⁻¹.

L'air pénètre dans la chaudière à température de 15 °C et pression de 1 bar. Il est porté à température de 1000 °C par combustion à pression constante, avant de passer autour des conduits d'eau. Lorsqu'il quitte la chaudière, sa température est de 180 °C.

L'eau pénètre dans la chaudière à 50 bar et 20 °C. Elle y circule à pression constante. On souhaite la porter jusqu'à une température de 850 °C, avec un débit de 3 kg s⁻¹.

1. Quel débit d'air faut-il admettre dans la chaudière pour respecter le cahier des charges ?
2. Quelle est l'efficacité de la chaudière ?
3. Un/e ingénieur/e propose de faire passer le conduit d'air d'admission au travers des gaz d'échappement (sans pourtant les mélanger) pour augmenter la température de l'air avant combustion. Cela vous paraît-il être une bonne idée ?



FIGURE 9.23 – La sciure de bois, produite en très grande quantité dans l'industrie, peut être utilisée comme source d'énergie dans une centrale à vapeur.

Photo CC-BY-SA par l'utilisateur-rice Commons Eivindmy

9.3 Cycle avec resurchauffe

L'installation de Porcheville décrite dans l'exercice 9.1 est modifiée pour accueillir une série de tubes de resurchauffe. La détente de l'eau est interrompue à 18 bar dans la turbine, et la vapeur est ramenée à la température maximale du cycle (c'est-à-dire 545 °C).

La centrale est alimentée au fioul lourd dit « TBTS », de masse volumique $1\,050\text{ kg m}^{-3}$ et de pouvoir calorifique $40,2\text{ MJ kg}^{-1}$. La chaudière a une efficacité de 80 %.

1. Quel est le nouveau rendement de l'installation ?
2. Quelle est la nouvelle consommation spécifique ?
3. Quel est le débit volumique horaire de carburant nécessaire pour générer 60 MW électriques ?

9.4 Cycle avec régénération

Dans un navire brise-glace polaire (figure 9.24), une installation à vapeur alimente les hélices à partir d'un réacteur nucléaire.

Le cycle est basé sur un cycle de Rankine surchauffé à 310 °C (par contact avec les conduites d'eau pressurisée qui, elle, traverse le réacteur), entre les pressions de 30 et 0,5 bar¹². Nous considérons que la turbine est parfaitement isolée et isentropique.

1. Quel est le rendement thermodynamique de l'installation ?
2. On définit la consommation spécifique de vapeur comme l'inverse de la puissance nette de l'installation. C'est la masse de vapeur ayant traversé la turbine lorsque l'installation a généré 1 kWh d'énergie mécanique.
Quelle est la consommation spécifique de l'installation ?



FIGURE 9.24 – Le 50 Let Podeby, brise-glace de 25 000 t à propulsion nucléo-turbo-électrique (deux réacteurs de $171\text{ MW}_{\text{chaleur}}$, trois moteurs de $17,6\text{ MW}_{\text{méch.}}$). Sa construction a débuté en 1989 mais il n'est entré en service qu'en 2007.

Photo CC-BY-SA par l'utilisateur-rice Commons Kiselev

Un/e ingénieur/e propose de modifier le cycle pour le rendre régénératif, en prélevant de la vapeur de la turbine pour l'insérer dans le circuit de compression.

Il/elle propose de séparer la compression en deux étapes, l'une de 0,5 à 6 bar, et la seconde de 6 à 30 bar ; et d'insérer la vapeur prélevée entre les deux pompes. Le débit de vapeur prélevé est tel que l'eau à la sortie du mélangeur est exactement à saturation.

Pour alléger nos calculs, nous considérons que la puissance de pompage n'est pas modifiée par la régénération.

3. Schématisez l'installation proposée (c'est-à-dire le circuit physique suivi par la vapeur).
4. Représentez le cycle thermodynamique sur un diagramme température-entropie, en traçant la courbe de saturation de l'eau.
5. Quelle proportion du débit de vapeur faudrait-il prélever à 6 bar dans la turbine, pour chauffer l'eau à saturation entre les deux pompes ?
6. La puissance aux hélices augmente-t-elle ou diminue-t-elle, et de combien ?
7. Le rendement de l'installation augmente-t-il ou diminue-t-il, et de combien ?

12. En réalité, entre 29 et 0,75 bar, valeurs qui ne sont pas tabulées dans nos abaques.

Résultats

① De nombreux exercices sont corrigés intégralement dans les annales publiées à l'adresse <http://thermo.ariadacapo.net/>.

- 9.1 2) $h_D = 2\,287,7 \text{ kJ kg}^{-1}$ 3) $h_B = 205,9 \text{ kJ kg}^{-1}$
4) $\eta_{\text{inst.}} = 35,29 \%$ 5) $SSC = 3,15 \text{ kg/(kW h)}$
6) $\dot{m}_{\text{eau}} = 52,5 \text{ kg s}^{-1}$
- 9.2 1) $\dot{m}_{\text{air}} = 15,2 \text{ kg s}^{-1}$ 2) $\eta_{\text{chaud.}} = 83,25 \%$
- 9.3 1) $h_{D2} = 2\,960,8 \text{ kJ kg}^{-1}$, $h_{E2} = 3\,570,3 \text{ kJ kg}^{-1}$, $h_F = 2\,642,7 \text{ kJ kg}^{-1}$: $\eta_{\text{inst.2}} = 36,31 \%$ (+1 pt)
2) $\dot{V}_{\text{carb.}} = 17,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.
- 9.4 1) $h_A = 340,5 \text{ kJ kg}^{-1}$, $h_B = 343,54 \text{ kJ kg}^{-1}$, $h_C = 3\,017,4 \text{ kJ kg}^{-1}$, $h_D = 2\,284,5 \text{ kJ kg}^{-1}$: $\eta_{\text{inst.}} = 27,294 \%$.
2) $SSC = 4,93 \text{ kg/(kW h)}$
5) $h_{\text{prélèvement}} = 2\,673,9 \text{ kJ kg}^{-1}$, $h_{\text{pré-mélange}} = 341,1 \text{ kJ kg}^{-1}$, $h_{\text{post-mélange}} = 670,4 \text{ kJ kg}^{-1}$: $z = 14,1 \%$
6) $w_{\text{net 2}} = -674,87 \text{ kJ kg}^{-1}$ (-9,2 %) 7) $q_{\text{chaud.}} = 2\,344,4 \text{ kJ kg}^{-1}$: $\eta_{\text{inst. 2}} = 28,786 \%$ (+1,49 pt)