

## Exercices chapitre 9

Version du 1<sup>er</sup> janvier 2015  
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 surchauffé

La centrale EDF de Porcheville (figure 9.23) 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 %.

Pour les besoins de l'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, de façon qualitative (c'est à dire sans représenter les valeurs numériques) en y représentant aussi la courbe de saturation.
2. Quelle est l'enthalpie de l'eau à la sortie des turbines ?
3. Quelle est l'enthalpie 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 ?
6. Quel débit horaire de vapeur faut-il faire circuler dans le circuit pour obtenir une puissance mécanique de 60 MW ?



FIGURE 9.23 – Centrale électrique de Porcheville, alimentée au charbon jusqu'en 1987 et fonctionnant désormais au fioul. Elle sert principalement les demandes de pointe.

Photo CC-0 o.c.

### 9.2 Mise en place d'une 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  $1050 \text{ kg m}^{-3}$  et de pouvoir calorifique  $40,2 \text{ MJ kg}^{-1}$ .

L'air utilisé pour la combustion pénètre dans la chaudière à température de 15 °C et pression de 1 bar. Il est porté à température de 820 °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.

1. Quel est le nouveau rendement thermique de la centrale ?
2. Quelle est sa nouvelle consommation spécifique ?
3. Quel débit d'air faut-il admettre dans la chaudière pour maintenir une puissance mécanique nette de 60 MW ?
4. Quelle est l'efficacité de la chaudière ?
5. Quel est le débit volumique horaire de carburant ?
6. 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 9.24 – 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 d

### 9.3 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  $310\text{ }^{\circ}\text{C}$  (par contact avec les conduites avec l'eau pressurisée qui, elle, traverse le réacteur), entre les pressions de 30 et  $0,5\text{ bar}^5$ .

Pour ne pas surcharger cet exercice, 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  $1\text{ kWh}$  d'énergie mécanique.  
Quelle est la consommation spécifique de l'installation ?

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  $6\text{ bar}$ , et la seconde de  $6$  à  $30\text{ bar}$  ; 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 simplifier nos calculs, nous considérons que la puissance de pompage n'est pas modifiée par la régénération (une approximation sans grande incidence).

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 de façon qualitative en y représentant aussi la courbe de saturation de l'eau.
5. Quelle proportion du débit de vapeur faudrait-il prélever à  $6\text{ bar}$  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 ?

---

5. En réalité, entre 29 et  $0,75\text{ bar}$ , 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** 1) Voir les figures 9.14 et 9.15 ; 2) Avec  $s_E = s_D = 6,5399 \text{ kJ kg}^{-1}$  et  $\eta_T = 80 \%$ , nous obtenons  $h_E = 2\,287,7 \text{ kJ kg}^{-1}$  comme à l'exemple 9.2 ;  
 3) Avec l'équation 9/4 nous obtenons  $h_B = 205,9 \text{ kJ kg}^{-1}$  comme à l'exemple 9.1 ;  
 4)  $\eta_{\text{thermique}} = \left| \frac{(h_E - h_D) + (h_B - h_A)}{(h_D - h_B)} \right| = 35,29 \%$  (6/4) ; 5)  $SSC = 3,15 \text{ kg/(kW h)}$  ;  
 6)  $\dot{m}_{\text{eau}} = 52,5 \text{ kg s}^{-1}$ .
- 9.2** 1)  $h_{D2} = 2\,960,8 \text{ kJ kg}^{-1}$ ,  $h_{E2} = 3\,570,3 \text{ kJ kg}^{-1}$ ,  $h_F = 2\,642,7 \text{ kJ kg}^{-1}$ , ainsi l'efficacité atteint  $\eta_{\text{thermique } 2} = 36,31 \%$  (+1 pt, une amélioration déjà appréciable) ; 2)  $SSC_2 = 2,576 \text{ kg/(kW h)}$  (−18 %, un beau résultat) ;  
 3) Dans la chaudière, la chaleur perdue par l'air est gagnée par l'eau :  $\dot{m}_{\text{air}} = \frac{-\dot{Q}_{\text{eau}}}{c_p \Delta T} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\eta_{\text{thermique}} c_p (T_{\text{air } 3} - T_{\text{air } 2})} = 256,9 \text{ kg s}^{-1}$ .  
 4)  $\eta_{\text{chaudière}} = \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\dot{Q}_{\text{reçue par l'air}}} = 79,5 \%$  5)  $\dot{V}_{\text{carb.}} = \frac{\dot{Q}_{\text{reçue par l'air}}}{\rho_{\text{carburant}} c_{\text{carburant}} \eta_{\text{chaudière}}} = 17,7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .  
 6) C'est une excellente idée. On réduit ainsi la chaleur emportée par les gaz d'échappement à la sortie de la chaudière, ce qui a pour effet immédiat d'augmenter  $\eta_{\text{chaudière}}$ .
- 9.3** 1) Avec le schéma des figures 9.14 et 9.15,  $h_A = 340,5 \text{ kJ kg}^{-1}$ ,  $h_B = 343,54 \text{ kJ kg}^{-1}$ ,  $h_D = 3\,017,4 \text{ kJ kg}^{-1}$ ,  $h_E = 2\,284,5 \text{ kJ kg}^{-1}$ , ainsi  $\eta_{\text{thermique}} = 27,294 \%$  ;  
 2)  $SSC = 4,93 \text{ kg/(kW h)}$  ; 3) Voir figure 9.20 ;  
 4) Voir figure 9.21 ; 5)  $h_{\text{prélèvement}} = 2\,673,9 \text{ kJ kg}^{-1}$ ,  $h_{\text{pré-mélange}} = 341,1 \text{ kJ kg}^{-1}$ ,  $h_{\text{post-mélange}} = 670,4 \text{ kJ kg}^{-1}$  : Ainsi la proportion permettant de saturer l'eau après mélange est  $z = 14,1 \%$  ;  
 6)  $w_{\text{net } 2} = -674,87 \text{ kJ kg}^{-1}$  (−9,2 % : drame !) ;  
 7)  $q_{\text{chaud.}} = 2\,344,4 \text{ kJ kg}^{-1}$ , ainsi  $\eta_{\text{inst. } 2} = 28,786 \%$  (+1,49 pt : est-ce vraiment désirable dans cette application ?).