

Exercices chapitre 8

Version du 23 septembre 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.

$$\begin{aligned}c_{v(\text{air})} &= 718 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} & R_{\text{air}} &= 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \\c_{p(\text{air})} &= 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} & \gamma_{\text{air}} &= 1,4\end{aligned}$$

Nous admettons que pour une évolution adiabatique réversible (sans apport de chaleur et infiniment lente) les propriétés de l'air suivent les trois relations suivantes :

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right) = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} \quad (4/36)$$

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right) = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4/37)$$

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma} \quad (4/38)$$

Nous admettons également que la variation d'entropie d'un gaz parfait, pour n'importe quelle évolution, est quantifiée par les relations suivantes :

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (8/11)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (8/12)$$

8.1 Détente d'un liquide/vapeur

Une masse de 10 kg d'eau est à 45 bar et 600 °C.

1. Quelle est la quantité maximale de travail qu'il est possible d'extraire de cette masse d'eau, sans lui fournir de chaleur, si on peut la détendre jusqu'à 4 bar ?
2. Si la détente était poursuivie jusqu'à une pression plus basse, à quelle température l'eau se condenserait-elle ?
3. Tracez qualitativement l'évolution suivie sur un diagramme température-entropie, en y représentant la courbe de saturation.

8.2 Variations élémentaires d'un gaz parfait

Parmi les évolutions d'un gaz parfait décrites en figure 8.11, identifiez l'évolution à température constante, à pression constante, isentropique, et à volume constant.

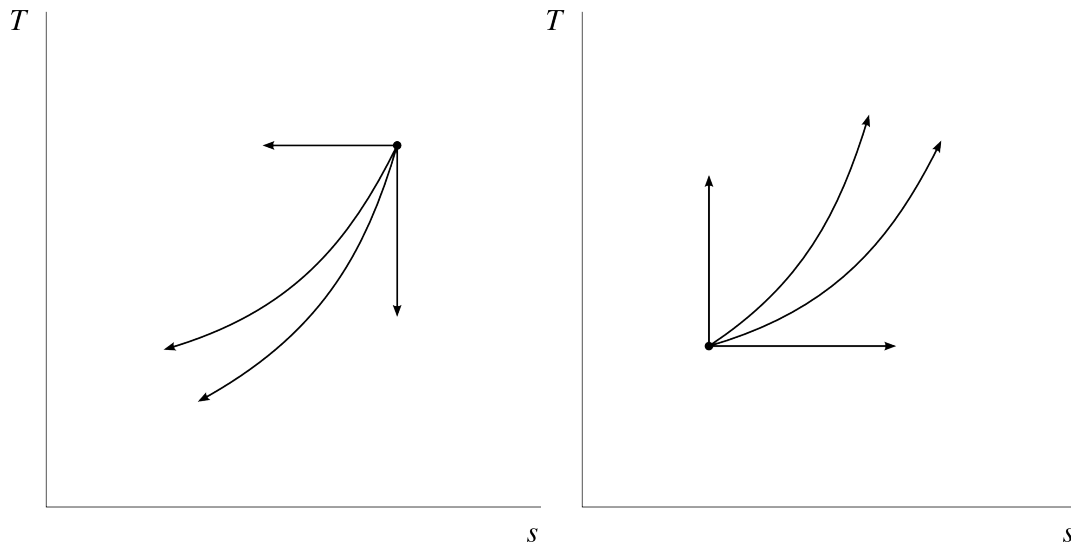


FIGURE 8.11 – Évolutions élémentaires d'un gaz parfait

8.3 Chauffage à température constante

On fournit lentement une quantité de chaleur $3\,000\text{ kJ kg}^{-1}$ à une masse d'eau liquide saturée à $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. La température est maintenue constante pendant toute l'évolution.

Quelle est la quantité de travail développée par l'eau pendant l'évolution ? Tracez qualitativement l'évolution suivie sur un diagramme température-entropie et un diagramme pression-volume, en y représentant la courbe de saturation.

8.4 Cycle de Carnot

Représentez qualitativement le cycle suivi par le fluide à l'intérieur d'une pompe à chaleur opérant selon le cycle de Carnot sur un diagramme température-entropie, en y représentant les deux transferts de chaleur.

Comment le cycle serait-il modifié si la compression et la détente restaient adiabatiques mais n'étaient pas réversibles ?

8.5 Turbine à vapeur

Dans une centrale à vapeur, un débit de 250 t h^{-1} de vapeur rentre à 55 bar et $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans la turbine.

La turbine détend la vapeur de façon adiabatique réversible. Lorsque la pression atteint 10 bar , on prélève de la vapeur avec un faible débit (1 kg s^{-1}), pour réchauffer une autre partie de la centrale. La vapeur restant dans la turbine est détendue jusqu'à une pression de $0,18\text{ bar}$.

Quelle est la puissance mécanique développée par la turbine ?

8.6 Sens des transformations (1)

Une masse d'air suit une évolution sans apport de chaleur. Il y a deux états :

- Un état X à 5 bar et $500\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Un état Y à 1 bar et $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Quel est le seul sens ($X \rightarrow Y$ ou $Y \rightarrow X$) dans lequel l'évolution peut avoir lieu ?
Représentez qualitativement l'évolution sur un diagramme pression-volume et température-entropie.

8.7 Sens des transformations (2)

De l'eau suit une évolution pendant laquelle on lui retire 2 MJ kg^{-1} de chaleur (sa température étant alors figée à 250°C). Il y a deux états, un au début et l'autre à la fin :

- Un état X à l'état de vapeur saturée à 200°C ;
- Un état Y à l'état de liquide saturé à 240°C .

Quel est le seul sens ($X \rightarrow Y$ ou $Y \rightarrow X$) dans lequel l'évolution peut avoir lieu ?

8.8 Détente d'air comprimé

L'air dans un cylindre isolé thermiquement est détendu depuis 6,8 bar et 430°C jusqu'à 1 bar. À la sortie, la température est mesurée à 150°C .

La détente est réversible ? Tracez qualitativement l'évolution sur un diagramme température-entropie.

8.9 Questions de cours

1. Quelle est la différence entre l'entropie et la capacité calorifique, qui ont toutes les deux les mêmes unités ?
 2. À quoi ressemblerait la figure 8.9 si le transfert de chaleur était poursuivi au-delà d'une quantité infinitésimale de chaleur dQ ?
-

8.10 Pompe à air

De l'air rentre dans une petite pompe centrifuge avec un débit de 4 kg min^{-1} . La pompe n'est pas isentropique, mais on peut négliger ses pertes de chaleur.

À l'entrée, l'air est à 1 bar et 15°C .

À la sortie, la pression est à 2 bar et on mesure la température à 97°C .

1. Quelle est la puissance requise pour alimenter le compresseur ?
 2. Quelle serait la puissance si la compression se faisait de façon isentropique ?
 3. Quels seraient les transferts de chaleur et de travail nécessaires pour ramener l'air à ses conditions initiales (en minimisant les transferts de chaleur) ?
-

8.11 Centrale électrique théorique

Pendant la conception d'une centrale électrique on étudie la possibilité de faire suivre à l'eau un cycle de Carnot. La chaleur dégagée par la combustion du charbon est transmise à une chaudière à vapeur. La vapeur est détendue dans une turbine, qui alimente une génératrice électrique.

De A à B L'eau est comprimée dans une pompe isentropique.

En A, le mélange liquide-vapeur est à pression de 0,04 bar.

En B, l'eau est à l'état de liquide saturé, à pression de 40 bar.

De B à C L'eau est chauffée à pression constante (40 bar) dans la chaudière. En C, l'eau est à l'état de vapeur saturée.

De C à D L'eau est détendue dans la turbine isentropique. En D, l'eau est à la pression initiale, c'est-à-dire 0,04 bar.

De D à A L'eau est refroidie dans un condenseur à pression constante (0,04 bar).

1. Schématisez les éléments du circuit suivi par la vapeur, et tracez qualitativement le cycle suivi sur un diagramme température-entropie, en y représentant la courbe de saturation.
2. Quel est le titre de l'eau lorsque la condensation est interrompue (en A) ? Quelle est alors l'enthalpie spécifique ?
3. Quel est le titre à la sortie de la turbine (en D) et l'enthalpie spécifique en ce point ?
4. Quelle est la puissance développée par la turbine ?
5. Quelle est la puissance de la chaudière ?
6. Quelle est la puissance de la pompe ?
7. Quel est le rendement de l'installation ?

8.12 Transferts de chaleur irréversibles

Un moteur à vapeur fonctionne sur un cycle de Carnot, avec un flux continu (débit : 2 kg s^{-1}), entre les points de saturation de l'eau. Le moteur est conçu pour exploiter une source de chaleur à moyenne température (400°C), issue de la combustion de déchets industriels, et rejeter de la chaleur dans une rivière à basse température (10°C).

La chaudière a des parois épaisses pour réduire l'impact des imperfections de fabrication et pour soutenir la pression élevée de l'eau. Cette épaisseur impose un gradient de température important à travers les parois (10°C). Il en va de même dans le condenseur (gradient : 5°C de gradient).

1. De combien l'entropie de l'ensemble {source de chaleur + eau} augmente-t-elle ?
2. De combien l'entropie de l'ensemble {puits de chaleur + eau} augmente-t-elle ?
3. Quelle est la perte de puissance associée à cette augmentation d'entropie ?
4. Quelle(s) propriété(s) du matériau constituant la chaudière sont-elles les plus désirables pour minimiser ce problème ?

8.13 Compressions et détente irréversibles

L'équipe d'ingénieurs en charge du moteur de l'exercice précédent (cycle de Carnot fonctionnant entre 290°C et 15°C) découvre que les phases de compression et détente ne se font pas de façon réversible.

Le compresseur amène bien l'eau à température haute mais sa consommation de travail est 10 % plus importante que prévu. La turbine amène bien l'eau à température basse, mais elle fournit 10 % d'énergie mécanique en moins que prévu.

1. De combien l'entropie de la vapeur augmente-t-elle dans chacun de ces deux composants ?
2. De combien augmentent les rejets de chaleur ?
3. Quelle est la perte en efficacité de l'installation par rapport à une installation réversible ?

Résultats

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

- 8.1** 1) $u_1 = 3\,276,4 \text{ kJ kg}^{-1}$ et $u_1 = 2\,703,3 \text{ kJ kg}^{-1}$: $W_{\max.} = -5,731 \text{ MJ}$.
2) $T_3 = 103,51 \text{ }^\circ\text{C}$
- 8.2** Dans le sens horaire, en partant de la verticale, sur les deux graphiques : isentropique, isochore, isobare, isotherme.
- 8.3** $s_2 = 8,671 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$; ainsi $u_2 = 2\,660,89 \text{ kJ kg}^{-1}$; enfin $w_{1 \rightarrow 2} = -1,19 \text{ MJ kg}^{-1}$.
- 8.5** $h_1 = 3\,803,5 \text{ kJ kg}^{-1}$; $h_2 = 2\,677,7 \text{ kJ kg}^{-1}$; $h_3 = 2\,413,6 \text{ kJ kg}^{-1}$: on a donc $\dot{W}_{\text{turbine}} = -96,26 \text{ MW}$.
- 8.6** $s_Y - s_X = +161,08 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ ainsi le sens est $X \rightarrow Y$.
- 8.7** On suppose $X \rightarrow Y$, alors $\Delta s = -3,728 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ mais $\int_X^Y \left(\frac{dq}{T} \right)_{\text{chemin réel}} = -3,823 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ ainsi le sens est bien $X \rightarrow Y$ (encore!).
- 8.8** $\Delta s = +39,77 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ mais $\int_1^2 \left(\frac{dq}{T} \right)_{\text{chemin réel}} = 0 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, ainsi la transformation est irréversible.
- 8.10** 1) $\dot{W}_{\text{pompe}} = +5,493 \text{ kW}$ 2) $\dot{W}_{\text{idéal}} = +4,231 \text{ kW}$
3) Détente lente pour obtenir $\dot{W}_{2 \rightarrow 1} = -4,231 \text{ kW}$ en refroidissant avec $\dot{Q}_{2 \rightarrow 1} = -1,262 \text{ kW}$.
- 8.12** 1) $\dot{S}_{\text{haute température}} = +91,77 \text{ W K}^{-1}$ (ou $\text{J}/(\text{K s})$)
2) $\dot{S}_{\text{basse température}} = +92,4 \text{ W K}^{-1}$ 3) $\dot{W}_{\text{perdue}} = +52,14 \text{ kW}$
- 8.13** 1) $\Delta s_{\text{compresseur}} = +1,454 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$; $\Delta s_{\text{turbine}} = +0,382 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
2) $+14,6 \%$ 3) -9 pt (jusqu'à $39,82 \%$)