

# Exercices chapitre 8

Version du 14 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.

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

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

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 :

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (8/10)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (8/11)$$

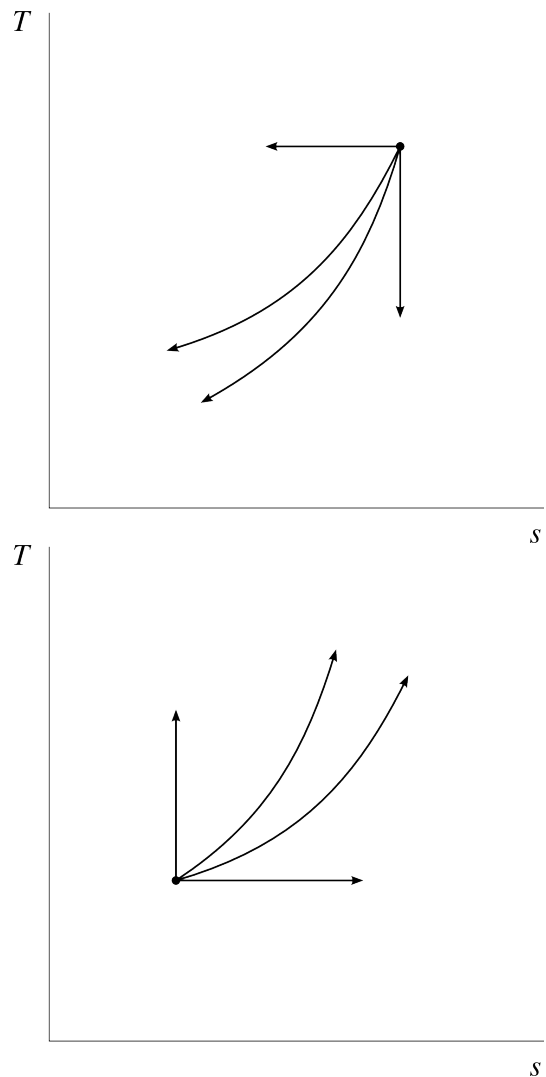


FIGURE 8.12 – Évolutions élémentaires d'un gaz parfait

## 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. Représentez l'évolution sur un diagramme température-entropie, de façon qualitative (c'est-à-dire sans représenter les valeurs numériques), et 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 8.12, identifiez l'évolution à température constante, à pression constante, isentropique, et à volume constant.

## 8.3 Chauffage à température constante

On fournit lentement une quantité de chaleur  $3000 \text{ kJ kg}^{-1}$  à une masse d'eau liquide saturée à 200 °C. La température est maintenue constante pendant toute l'évolution.

Quelle est la quantité de travail développée par l'eau pendant l'évolution ? Représentez l'évolution sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative et en y représentant la courbe de saturation.

## 8.4 Cycle de Carnot

Représentez le cycle suivi par le fluide à l'intérieur d'une pompe à chaleur opérant selon le cycle de Carnot sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative, et 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  $250 \text{ t h}^{-1}$  de vapeur rentre à 55 bar et  $660^\circ\text{C}$  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 ( $1 \text{ kg s}^{-1}$ ), pour réchauffer une autre partie de la centrale. La vapeur restant dans la turbine est détendue jusqu'à une pression de 0,18 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  $500^\circ\text{C}$  ;
- Un état  $Y$  à 1 bar et  $300^\circ\text{C}$ .

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

Représentez l'évolution sur un diagramme pression-volume et sur un diagramme température-entropie, de façon qualitative.

---

## 8.7 Sens des transformations (2)

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

- Un état  $X$  à l'état de vapeur saturée à  $200^\circ\text{C}$  ;
- Un état  $Y$  à l'état de liquide saturé à  $240^\circ\text{C}$ .

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  $430^\circ\text{C}$  jusqu'à 1 bar.

À la sortie, la température est mesurée à  $150^\circ\text{C}$ .

La détente est-elle réversible ? Représentez l'évolution sur un diagramme température-entropie, de façon qualitative.

---

## 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 8.10 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  $4 \text{ kg min}^{-1}$ . La pompe n'est pas isentropique, mais on peut négliger ses pertes de chaleur.

À l'entrée, l'air est à 1 bar et  $15^\circ\text{C}$ .

À la sortie, la pression est à 2 bar et on mesure la température à  $97^\circ\text{C}$ .

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 représentez l'évolution sur un diagramme température-entropie, de façon qualitative et 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 :  $2 \text{ kg s}^{-1}$ ), entre les points de saturation de l'eau. Le moteur est conçu pour exploiter une source de chaleur à moyenne température ( $400^\circ\text{C}$ ), issue de la combustion de déchets industriels, et rejeter de la chaleur dans une rivière à basse température ( $10^\circ\text{C}$ ).

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 ( $10^\circ\text{C}$ ). Il en va de même dans le condenseur (gradient :  $5^\circ\text{C}$  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 détentes irréversibles

L'équipe d'ingénieurs en charge du moteur de l'exercice précédent (cycle de Carnot fonctionnant entre  $290^\circ\text{C}$  et  $15^\circ\text{C}$ ) 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  $u_2 = 2\,703,3 \text{ kJ kg}^{-1}$  :  $W_{\max.} = -5,731 \text{ MJ}$ .  
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)  $-9 \text{ pt}$  (jusqu'à  $39,82 \%$ )

