

# Exercices chapitre 7

Version du 5 novembre 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 :

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

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

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

## 7.1 Efficacité maximale d'un moteur

Quelle est l'efficacité maximale qu'un moteur puisse atteindre en opérant dans de l'air à température ambiante (15 °C), et dont la température maximale est de 800 °C ?

## 7.2 Efficacité maximale d'un réfrigérateur

Quelle est l'efficacité maximale théorique qu'un congélateur domestique pourrait atteindre en fonctionnant entre les températures de -6 °C et 20 °C ?

Pour quelle(s) raison(s) les rendements atteints par les congélateurs usuels (environ 3) sont-ils inférieurs ?

## 7.3 Efficacité maximale d'une pompe à chaleur

Une personne souhaite installer une thermopompe pour chauffer son domicile avec une puissance de 10 kW.

1. Expliquez brièvement pourquoi la performance d'une pompe à chaleur s'exprime selon :

$$\eta_{\text{thermopompe}} = \left| \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{W}_{\text{net}}} \right| \quad (7/9)$$

2. Estimez la consommation minimale théorique de la pompe un soir de grand froid ( $T_{\text{ext.}} = -2 \text{ °C}$ ;  $T_{\text{int.}} = 20 \text{ °C}$ )
3. Quelle sera la consommation minimale de la pompe à chaleur lorsque les températures interne et externe seront de 17 °C et 16 °C respectivement ?
4. Quelle sera la consommation minimale théorique de la pompe dans le cas où les températures interne et

externe sont identiques ? Que se passe-t-il en théorie si la température externe est plus grande qu'à l'intérieur ?

## 7.4 Cycle de Carnot

1. Décrivez brièvement les quatre phases d'un cycle moteur de Carnot, en indiquant le sens des transferts de chaleur.
2. Pourquoi les transferts de chaleur sont-ils isothermes ?
3. Est-il préférable d'utiliser un gaz parfait ou un mélange liquide-vapeur pour effectuer ce cycle ?
4. Quels problèmes pratiques le cycle de Carnot pose-t-il ?

## 7.5 Moteur de Carnot à vapeur

On tente de mettre en place une centrale à vapeur basée sur le cycle de Carnot pour fabriquer de l'électricité. La chaudière fonctionne à température maximale de 275 °C et admet de l'eau à l'état de liquide saturé. Lorsque l'eau sort de la chaudière et rentre dans la turbine, elle est à l'état de vapeur saturée.

1. Tracez le cycle suivi par l'eau sur un diagramme pression-volume, en indiquant la courbe de saturation (prendre garde aux particularités des mélanges liquide-vapeur !)
2. À quelle pression environ faudrait-il refroidir la vapeur pour obtenir un rendement de 40 % ?
3. Quelle serait la puissance fournie par l'installation si son débit massique était de 3 kg s<sup>-1</sup> ?
4. [Question difficile<sup>20</sup>] À quoi ressembleraient le cycle et la machine si l'on continuait à chauffer la vapeur à température constante de 275 °C à la sortie de la chaudière ? Comment varierait alors l'efficacité du moteur ?

## 7.6 Réversibilité des machines

De la même façon qu'en figure 7.7, démontrez par l'absurde qu'on ne peut concevoir une pompe à chaleur (ou un réfrigérateur) de rendement supérieur à une machine thermique réversible.

## 7.7 Moteur à turbine idéal

Un groupe d'ingénieurs dans un bureau d'études travaille sur la conception d'un moteur à air, fonctionnant en régime continu à l'aide de turbines et de compresseurs.

Les ingénieurs utilisent le cycle de Carnot pour point de départ. Ils prévoient de pouvoir effectuer l'apport de chaleur à température de 600 °C et le rejet de chaleur à température de 20 °C. La pression est de 1 bar à l'entrée du compresseur adiabatique et de 30 bar à l'entrée de la turbine adiabatique. Ces caractéristiques confèrent au moteur une puissance mécanique spécifique de 70 kJ kg<sup>-1</sup>.

1. Représentez l'agencement général de ce moteur hypothétique, en y représentant le circuit suivi par l'air, et tous les transferts de chaleur et de travail.

20. Il peut être utile de se référer au §5.4.4 ici.

2. À partir de la définition du rendement d'un moteur, montrez que l'efficacité d'un moteur réversible est quantifiable selon l'équation

$$\eta_{\text{moteur Carnot}} = 1 - \frac{T_B}{T_H} \quad (7/6)$$

3. Quelle puissance sous forme de chaleur faudra-t-il fournir au moteur ?
4. Quelle sera alors la puissance rejetée sous forme de chaleur ?

Bien sûr, le cycle de Carnot est impraticable dans une application industrielle et le groupe d'ingénieurs adopte une modification, car pour pouvoir effectuer l'apport de chaleur par combustion interne, il faut pouvoir ensuite renouveler l'air du moteur. Ils décident ainsi d'interrompre la détente dans la turbine adiabatique lorsque la pression atteint 1 bar, et de rejeter l'air « usagé » dans l'atmosphère.

Ainsi, dans ce nouveau moteur :

- La turbine adiabatique fonctionne désormais entre 30 bar et 1 bar ;
- Le rejet de chaleur s'effectue dans l'atmosphère à pression constante de 1 bar.

Le reste du moteur n'est pas affecté.

5. Représentez le nouveau cycle sur un diagramme pression-volume, en le comparant au cycle de Carnot plus haut.
6. Quelle est la température de l'air lorsqu'il est rejeté du moteur à la sortie de la turbine adiabatique ?
7. Quelle est ainsi la réduction de la puissance de la turbine adiabatique par rapport au moteur idéal ?
8. Quelle puissance mécanique est économisée par la suppression du compresseur qui effectuait le rejet de chaleur ?
9. Quelle est désormais l'efficacité du moteur ?

## 7.8 Cycle idéal et réel d'un réfrigérateur

Nous nous proposons d'étudier le fonctionnement d'un réfrigérateur en partant d'un cycle théorique permettant un rendement maximal.

Le réfrigérateur fonctionne strictement sur un cycle de Carnot, en régime permanent, avec un mélange liquide-vapeur.

- Représentez le cycle de réfrigération sur un diagramme température-entropie ou pression-volume, en indiquant le sens des transferts de chaleur et de travail.

Bien sûr, en pratique, la compression et la détente ne peuvent se faire de façon réversible.

- Représentez le cycle irréversible sur le diagramme température-entropie ou pression-volume.
- De quelle façon variera chacun des transferts de chaleur et de travail par rapport au cas théorique ?
- Montrez brièvement que ces variations conduisent à une baisse du rendement (« COP ») du réfrigérateur.

## 7.9 Cycle réversible de réfrigération

Une usine chimique utilise un système de réfrigération pour contrôler la température de produits dangereux. Nous cherchons à étudier le système de réfrigération le moins inefficace pour l'équiper, ici basé sur le cycle de Carnot.

La température minimale de réfrigération est de  $-50^\circ\text{C}$  et la chaleur est rejetée à  $40^\circ\text{C}$ .

1. Représentez un cycle de réfrigération basé sur un cycle de Carnot sur un diagramme pression-volume ou température-entropie.

En étudiant le cycle, un/e ingénieur/e constate que le rendement du réfrigérateur augmente si la température de rejet de chaleur est abaissée.

Il/elle propose de configurer le réfrigérateur de telle sorte à ce qu'il rejette de la chaleur à  $10^\circ\text{C}$  seulement. Cette chaleur à  $10^\circ\text{C}$  serait captée par une pompe à chaleur qui la mènerait enfin à  $40^\circ\text{C}$ .

2. Montrez que si le réfrigérateur fonctionne sur un cycle réversible, la modification proposée ne pourra qu'augmenter (ou au mieux, garder identique) la consommation totale du système de réfrigération.
3. Représentez le cycle de la pompe à chaleur telle que le propose l'ingénieur/e, sur le diagramme pression-volume ou température-entropie plus haut.
4. Représentez, sur un diagramme température-entropie ou pression-volume, les cycles suivis par les deux machines si leurs phases de détentes étaient adiabatiques (sans transfert de chaleur) mais non-réversibles.

## 7.10 Moteur essence basé sur un cycle de Carnot

On souhaite quantifier la consommation d'essence minimale que pourrait engendrer un moteur automobile générant 100 kW de puissance (environ 130 ch), étant données quelques contraintes pratiques imposées par le faible volume disponible et les limites de poids :

- Le taux de compression (c'est-à-dire le rapport  $\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}$ ) est de 12 lors des phases adiabatiques (afin de limiter les contraintes mécaniques) ;
- La température maximale est de 1 300 K (imposée par la résistance des matériaux) ;
- Le moteur aurait quatre cylindres effectuant chacun 400 cycles par minute.

Le moteur est alimenté par de l'essence dont la chaleur spécifique de combustion est de  $40 \text{ MJ kg}^{-1}$ .

Si l'on considère le meilleur moteur que l'on puisse concevoir :

1. À quelle température la chaleur serait-elle rejetée ?
2. Quel serait le rendement du moteur ?
3. Quelle serait la quantité de chaleur à fournir pour chaque combustion, et la masse de carburant correspondante ?
4. Quelle serait la consommation horaire d'essence ?

# Résultats

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

7.1 73,1 %

7.2  $COP_{\text{réf.}} = 10,3$

7.3 1) cf. §6.3.3

3)  $\dot{W}_{\text{net}} = 34,5 \text{ W}$  (!)  
devient moteur...

2)  $\dot{W}_{\text{net}} = 750,8 \text{ W}$

4)  $\dot{W}_{\text{net}} = 0 \text{ W}$  ; travail net négatif : la pompe

7.5 2) 0,1285 bar

1,889 W

3)  $q_{\text{in}} = h_{LV} = 1\,574,3 \text{ kJ kg}^{-1}$  : on obtient  $\dot{W}_{\text{net}} =$

4) Efficacité inchangée

7.7 3)  $q_{\text{in}} = 105,4 \text{ kJ kg}^{-1}$

6)  $T_E = 330,4 \text{ K}$

8)  $w_{\text{économisée}} = +35,4 \text{ kJ kg}^{-1}$

4)  $q_{\text{out}} = -35,4 \text{ kJ kg}^{-1}$

7)  $w_{\text{perdue}} = 37,54 \text{ kJ kg}^{-1}$

9) 64,38 %

7.10 1)  $T_{\text{rejet}} = 208^\circ\text{C}$

3)  $\dot{Q}_{\text{in}} = 158,8 \text{ kW}$  donc  $Q_{\text{comb.}} = 5,955 \text{ kJ}$  à chaque combustion.  $m_{\text{carb.comb.}} = 0,148 \text{ g}$

4)  $\dot{m}_{\text{carb.}} = 14,3 \text{ kg h}^{-1}$

2) 63 %

