

Exercices chapitre 6

Version du 24 octobre 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 :

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

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

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

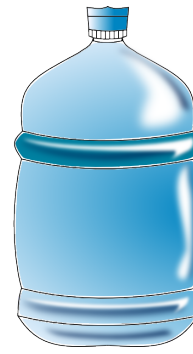


FIGURE 6.14 – Ingrédient primaire d'un week-end d'intégration réussi.

6.1 Efficacité d'un moteur

Le moteur Diesel d'une excavatrice a une efficacité de 40 % et développe une puissance continue de 80 ch (c'est-à-dire 60 kW). Il est alimenté par du carburant de capacité calorifique 35 MJ kg⁻¹.

1. Quelle est la consommation horaire de carburant de la machine ?
2. Quelle est la puissance qu'elle rejette sous forme de chaleur dans le conduit d'échappement ?

6.2 Efficacité d'un réfrigérateur

Un réfrigérateur dont le COP est de 1,2 doit extraire 100 kJ d'un aliment placé dans l'enceinte à basse température. Combien d'énergie électrique consommera-t-il pour cela ? Quelle quantité de chaleur aura-t-il rejeté à la fin du refroidissement ?

6.3 Efficacité d'une pompe à chaleur

Une pompe à chaleur dont le COP est de 3,1 fournit une puissance de 4000 W à une habitation. Quelle est la puissance électrique consommée ? Quelle est la puissance absorbée à l'atmosphère ?

6.4 Thermodynamique de soirée

Un/e étudiant/e assoiffé/e par un cours de thermodynamique interminable prépare son week-end en plaçant un bidon d'eau minérale de 15 L (capacité thermique 4,2 kJ kg⁻¹ K⁻¹, figure 6.14) au réfrigérateur. Le bidon est à température ambiante (19 °C) et il est ainsi refroidi jusqu'à 5 °C.

Le réfrigérateur a un rendement de 95 %. Les parois du réfrigérateur, imparfaitement isolées, absorbent de la chaleur de la pièce avec une puissance de 10 W.

Au bout de deux heures, la température du bidon a atteint celle de l'intérieur du réfrigérateur.

1. Quelle quantité d'énergie électrique le réfrigérateur a-t-il consommée pendant ce temps ?
2. La pièce s'est-elle refroidie, ou réchauffée ?
3. La pièce se refroidira-t-elle si la porte du réfrigérateur est laissée ouverte ?

6.5 Pompe à chaleur

Décrivez le cycle thermodynamique suivi par le fluide à l'intérieur d'une pompe à chaleur, en indiquant le sens des flux de chaleur et l'emplacement (intérieur/extérieur) des différents composants.

Pourquoi laisse-t-on le fluide se détendre dans une soupape, au lieu d'utiliser une turbine qui pourrait fournir du travail ?

Cet exercice peut être reproduit en remplaçant « pompe à chaleur » par « climatiseur », « réfrigérateur », ou « moteur »

6.6 Algèbre

Montrez, à partir de la définition du rendement du climatiseur, que celui-ci peut s'exprimer selon la relation :

$$\eta_{\text{climatiseur}} = \frac{1}{\left| \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} \right| - 1} \quad (6/7)$$

Cet exercice peut être reproduit en s'attaquant de la même manière aux équations 6/5 et 6/9. Attention aux valeurs absolues !

6.7 Refroidissement d'une soufflerie

La soufflerie ETW (pour *European Transonic Windtunnel*) permet la circulation d'azote dans un circuit fermé pour observer les écoulements autour de maquettes. Elle permet d'atteindre Mach 0,8 à 4 bar et $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, à l'aide d'une soufflante de 50 MW.

Les parois de la soufflerie sont fortement isolées, de sorte que ses transferts thermiques avec l'extérieur sont négligeables devant les autres transferts énergétiques. Le système de refroidissement de l'azote a un COP de 0,8.

Lorsque la soufflerie fonctionne à plein régime, quelle puissance mécanique est consommée par le système de refroidissement ? Quelle puissance est rejetée sous forme de chaleur dans l'atmosphère ?

6.8 Génératrice d'électricité à turbine

Un turbomoteur est configuré en génératrice de courant électrique (figure 6.15) ; il fonctionne avec de l'air atmosphérique.

- L'air pénètre dans la machine à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et 1 bar avec un débit de $0,5\text{ kg s}^{-1}$; il est comprimé ($A \rightarrow B$) jusqu'à 30 bar dans le compresseur.
- L'air reçoit ensuite de la chaleur par combustion, à pression constante ($B \rightarrow C$), jusqu'à ce que sa température atteigne $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- L'air est enfin détendu dans une turbine ($C \rightarrow D$) jusqu'à retrouver la pression atmosphérique et être rejeté à l'extérieur.

Le compresseur est alimenté mécaniquement par la turbine ; et l'arbre qui les relie entraîne également la génératrice de courant.

Pour étudier le rendement maximal qui pourrait être atteint par la machine, nous considérons que le compresseur et la turbine sont adiabatiques réversibles (c'est-à-dire que la compression et la détente se font de façon très lente et sans transfert de chaleur).

1. À quelle température l'air sort-il du compresseur ?
2. Quelle est la puissance du compresseur ? Est-ce une puissance fournie ou une puissance consommée ?
3. À quelle température l'air est-il rejeté dans l'atmosphère ? Quelle puissance est rejetée sous forme de chaleur dans l'atmosphère ?
4. Quelle est l'efficacité de la machine ?

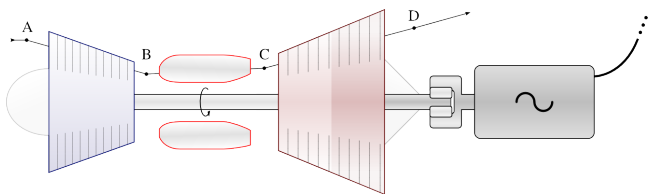


FIGURE 6.15 – Turbomoteur alimentant une génératrice électrique. On tente généralement de détendre le gaz (dans la turbine, entre C et D) jusqu'à pression atmosphérique.

schéma CC-0 o.c.

5. Comment les quatre transferts énergétiques de cette machine théorique se comparent-ils à ceux d'une machine réelle, dans laquelle le compresseur et la turbine ne peuvent pas être réversibles ?

6.9 Réfrigération industrielle

Une chaîne de supermarchés fait appel à votre expertise pour évaluer la rentabilité d'un projet de remplacement de système de réfrigération.

Tous les supermarchés de l'entreprise utilisent le même modèle de réfrigérateur. Son efficacité est de 100 %.

En vous déplaçant jusqu'à un supermarché représentatif, vous effectuez des mesures et étudiez les transferts thermiques du bâtiment, et découvrez que :

- La puissance absorbée sous forme de chaleur par la chambre froide des réfrigérateurs, moyennée sur l'année, est de 80 kW.
- L'hiver, le bâtiment perd de la chaleur avec une puissance moyenne de 400 kW. Il est réchauffé avec une batterie de pompes à chaleur de COP 4.
- L'été, le bâtiment absorbe de la chaleur avec une puissance moyenne de 160 kW. Il est refroidi avec une batterie de climatiseurs de COP 0,9.
- Pendant l'automne et le printemps, les besoins en chauffage/refroidissement sont quasi-nuls.

L'entreprise envisage de remplacer toute sa flotte de réfrigérateurs avec un modèle d'efficacité 120 %, ce qui demande un investissement important. Elle compte 100 supermarchés au total, et paie l'électricité 0,15 € par kWh en moyenne.

Quelle serait l'économie financière annuelle générée par le changement de réfrigérateur ?

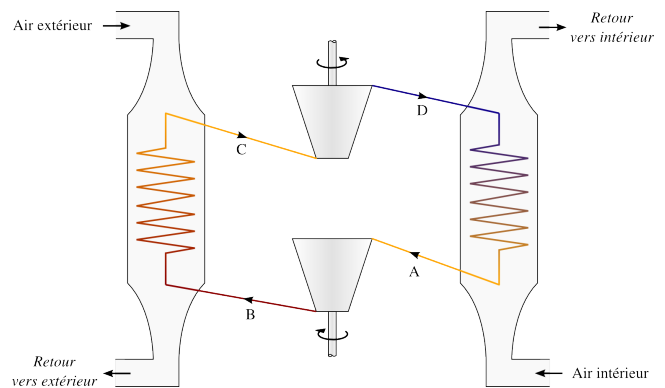


FIGURE 6.16 – Schéma de principe d'un climatiseur. L'air du circuit du climatiseur tourne en continu ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$), sans jamais quitter la machine.

schéma CC-0 o.c.

6.10 Fonctionnement d'un climatiseur

Un climatiseur fonctionne selon le circuit schématisé en figure 6.16. Le fluide utilisé dans le circuit est de l'air³.

L'air à l'intérieur du circuit y tourne de façon continue. Le compresseur et la turbine sont tous les deux adiabatiques et nous considérons qu'ils sont réversibles. Les échanges de chaleur se font à pression constante.

Lorsqu'on met en route le climatiseur, la température extérieure et la température intérieure sont égales à 30 °C.

Les températures de l'air à l'intérieur du circuit sont $T_A = 20\text{ °C}$, $T_B = 60\text{ °C}$, et $T_C = 40\text{ °C}$.

1. Représentez l'évolution de l'air du circuit sur un diagramme pression-volume, en y représentant les transferts de travail et de chaleur.
2. Quel est le rapport des pressions entre A et B ?
3. Quelle est la température de l'air du circuit en D ?
4. Calculez les puissances spécifiques pour chacun des quatre transferts énergétiques, et calculez ainsi l'efficacité du climatiseur.
5. Le/la propriétaire souhaite obtenir un flux d'air frais à 10 °C de débit $0,25\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. Quelle puissance électrique faut-il fournir au climatiseur pour cela ?
6. Quel sera alors le débit minimal d'air extérieur à faire circuler dans la section extérieure du climatiseur ?
7. Pendant l'hiver, le/la propriétaire souhaite modifier le climatiseur pour le transformer en pompe à chaleur. Décrivez (qualitativement) une modification du circuit pour cela, et tracez l'évolution de l'air du circuit sur un nouveau diagramme pression-volume en y indiquant les transferts énergétiques.

6.11 Performances d'un réfrigérateur domestique

Un/e ingénieur/e fait l'achat d'un réfrigérateur domestique (figure 6.17) et se surprend de ne pas trouver mention de son efficacité dans le copieux manuel d'utilisation. Il/elle tente de l'estimer à l'aide des caractéristiques indiquées au dos du réfrigérateur :

- Puissance 90 W (interprétation : puissance électrique maximale)
- Consommation 0,548 kWh/24h (interprétation : puissance électrique moyenne)
- Capacité de congélation : 2 kg/24h. (interprétation : puissance de congélation maximale, pour de l'eau pure)
- Contenance : congélateur 40 L, réfrigérateur 112 L

La capacité calorifique massique de l'eau liquide est de $4,2\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$. Son changement de phase nécessite en outre 300 kJ kg^{-1} . Une fois solide, sa capacité calorifique massique est de $2,04\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$.

1. Si la puissance maximale de congélation du réfrigérateur est atteinte lorsqu'il fonctionne à puissance maximale, et que l'on néglige les défauts d'isolation, quelle est son efficacité ?

3. On utilise souvent, en pratique, des fluides qui se liquéfient et s'évaporent dans la machine ; mais le principe de fonctionnement reste le même.



FIGURE 6.17 – Fascinante machine thermodynamique

2. On suppose que la consommation électrique moyenne annoncée (0,548 kWh/24h) est mesurée en mode de fonctionnement normal (toutes températures stabilisées), sans ouvrir la porte. Dans ce cas, quelle est la puissance des pertes de la chambre froide sous forme de chaleur ?
3. En estimant le volume d'air renouvelé lors de l'ouverture de la porte, calculez le coût électrique d'une brève ouverture de la porte du réfrigérateur.

6.12 Cycle moteur à vapeur

Dans une centrale à vapeur, l'eau circule en continu en traversant quatre composants :

- Une pompe quasi-adiabatique dans laquelle elle rentre à l'état de liquide saturé et qui porte sa pression depuis 0,5 bar jusqu'à 40 bar ;
- Une chaudière dans laquelle sa température est portée à 620 °C, à pression constante ;
- Une turbine quasi-adiabatique qui laisse l'eau retourner jusqu'à 0,5 bar en perdant de l'énergie sous forme de travail ;
- Un condenseur qui refroidit l'eau à pression constante (0,5 bar) jusqu'à son retour dans la pompe.

Nous supposons en outre que :

- À la sortie de la turbine, la vapeur est⁴ à température de 110 °C.
- La pompe est quasi-réversible et que la masse volumique de l'eau ne varie pas lorsqu'elle la traverse.

Quelle est l'efficacité du moteur ?

6.13 Calculs thermodynamiques de cuisine

Il est souvent dit qu'il ne faut pas placer d'aliments encore « chauds » au réfrigérateur. Le but de cet exercice est d'identifier et de quantifier le surcoût engendré.

On place un aliment (1 kg) de capacité thermique $6\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$ encore « chaud » (température 30 °C) au réfrigérateur (5 °C).

1. Quelle quantité de chaleur le réfrigérateur devra-t-il lui soutirer pour l'amener à température de conservation ?
2. Quel est l'excédent par rapport au cas où l'aliment aurait été inséré à température ambiante (20 °C) ?

4. Après le chapitre 8 (*l'entropie*) nous saurons prédire cette température de sortie.

Cet excédent énergétique devra être inutilement extrait de la chambre froide par le réfrigérateur, et représente ainsi un coût électrique que l'on souhaite quantifier.

Nous supposons que le réfrigérateur, ancien, a un rendement de 65 %, et nous négligeons ses défauts d'isolation, tout comme ceux de la pièce qui le contient.

3. Quelle quantité supplémentaire d'énergie électrique est consommée par le réfrigérateur ?
4. Quelle quantité supplémentaire de chaleur est rejetée dans la pièce par le réfrigérateur ?

Le tarif d'électricité local est de $0,15 \text{ €/kW h}$. Quel aura été le coût total engendré par le fait d'avoir placé l'aliment encore « chaud » au réfrigérateur :

5. si la pièce est chauffée avec un radiateur électrique ?
(la chaleur dégagée par le réfrigérateur ne doit alors pas être dégagée par le radiateur)
6. si la pièce est chauffée avec une thermopompe de COP 3,5 ?
(la chaleur dégagée par le réfrigérateur ne doit alors pas être dégagée par la thermopompe)
7. si la pièce est climatisée à l'aide d'un climatiseur d'efficacité 0,8 ?
(la chaleur dégagée par le réfrigérateur devant alors être extraite par le climatiseur)

Résultats

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

- 6.1 1) $\dot{m} = 15,4 \text{ kg h}^{-1}$ 2) $\dot{Q}_{\text{out}} = -90 \text{ kW}$
- 6.2 $W_{\text{net}} = +83,3 \text{ kJ}$; $Q_{\text{out}} = -183,3 \text{ kJ}$
- 6.3 $\dot{W}_{\text{net}} = +1,29 \text{ kW}$; $\dot{Q}_{\text{in}} = +2,71 \text{ kW}$
- 6.4 1) $W_{\text{net}} = +1\,004,2 \text{ kJ}$ 2) réchauffée
3) non, elle se réchauffera également
- 6.7 $\dot{W}_{\text{net réf.}} = +62,5 \text{ MW}$ (sacré réfrigérateur); $\dot{Q}_{\text{out réf.}} = -112,5 \text{ MW}$
- 6.8 1) $T_B = 774,3 \text{ K}$ 2) $\dot{W}_{A \rightarrow B} = +241 \text{ kW}$
3) $T_D = 581,7 \text{ K}$; $\dot{Q}_{D \rightarrow A} = -94,8 \text{ kW}$ 4) 62,3 %
5) voir §2.4.3
- 6.9 Économie annuelle de $-21,32 \text{ k€}$ par supermarché. Les nouveaux réfrigérateurs permettent d'économiser 13,3 kW au printemps/automne, 10,1 kW en hiver, 28,2 kW en été.
- 6.10 3) $\frac{p_B}{p_A} = 1,565$ 4) $T_D = 275,4 \text{ K}$
5) $w_{\text{in}} = +40,2 \text{ kJ kg}^{-1}$; $q_{\text{out}} = -20,1 \text{ kJ kg}^{-1}$; $w_{\text{out}} = +37,79 \text{ kJ kg}^{-1}$; $q_{\text{in}} = +17,69 \text{ kJ kg}^{-1}$; $\eta = 7,326$
6) $\dot{W}_{\text{net}} = +845 \text{ W}$; $\dot{m}_{\text{circuit}} = 0,35 \text{ kg s}^{-1}$
- 6.11 1) $\eta = 0,101$ (en pratique plus haut) 2) $\dot{Q}_{\text{parois}} = 2,31 \text{ W}$
3) En estimant 56 L : 0,42 ct
- 6.12 31,47 %
- 6.13 1) 150 kJ 2) 60 kJ
3) 92,3 kJ 4) $-152,3 \text{ kJ}$
5) 0 J 6) 41,53 kJ
7) 282,7 kJ soit un coût effarant de 0,012 €.