

# Machines thermiques

## Exercice 1 - Cycle Diesel

### Moteur

Un moteur Diesel (Rudolf Diesel était un ingénieur allemand) est un moteur à quatre temps, dont la modélisation est la suivante :

- ▷ premier temps : admission isobare  $A_0A_1$  de l'air seul ;
- ▷ deuxième temps : compression adiabatique réversible  $A_1A_2$  de l'air ;
- ▷ troisième temps : introduction du combustible avec combustion isobare  $A_2A_3$  de telle manière que cette étape soit un échauffement isobare, puis détente adiabatique réversible  $A_3A_4$  ;
- ▷ quatrième temps : refroidissement isochore  $A_4A_1$ , suivi d'un refoulement  $A_1A_0$ .

L'air est assimilé à un gaz parfait diatomique ( $\gamma = 1,4$ ) de constante  $r = \frac{R}{M} = 290 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ . On note  $P_i$ ,  $T_i$  et  $V_i$  les pressions, température et volume à l'état  $A_i$ . On donne  $P_1 = 10^5 \text{ Pa}$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$ ,  $T_2 = 1020 \text{ K}$ ,  $V_1 = 2,5 \text{ L}$  et  $V_3 = 0,25 \text{ L}$ . L'entropie d'un gaz parfait s'écrit :

$$S = m \frac{r}{\gamma - 1} \ln T + mr \ln V + \text{cste} = m \frac{\gamma r}{\gamma - 1} \ln T - mr \ln P + \text{cste}.$$

1. Tracer l'allure du cycle  $A_1A_2A_3A_4$  dans un diagramme de Watt (les étapes  $A_0A_1$  et  $A_1A_0$  sont supposées se compenser). Tracer aussi le cycle en diagramme  $T - S$ .
2. Identifier les phases de contact avec les sources chaude et froide.
3. Quelle est la masse  $m$  d'air dans le cycle ?
4. Calculer  $P_2$  et  $V_2$  puis  $T_3$ .
5. Calculer  $P_4$  et  $T_4$ .
6. Montrer que le transfert thermique avec la source chaude vaut :

$$Q_c = -\frac{\gamma mr}{\gamma - 1}(T_2 - T_3),$$

et le calculer.

7. Calculer numériquement le transfert thermique avec la source froide  $Q_f$  et en déduire le travail  $W$ .
8. En déduire le rendement  $\eta$  du moteur. Faire l'application numérique.
9. Comparer au rendement  $\eta_{\text{Carnot}}$  d'un cycle de Carnot dont les sources sont aux températures  $T_1$  et  $T_3$ .
10. Comparer au rendement  $\eta_{\text{BR}} = 1 - \alpha^{1-\gamma}$  d'un cycle Beau de Rochas, où  $\alpha = V_{\text{max}}/V_{\text{min}}$ .

## Exercice 2 - Climatiseur

### Récepteur

On souhaite réaliser la climatisation d'un local afin de maintenir sa température à la valeur  $T_1 = 300$  K alors que sa température extérieure est  $T_2 = 315$  K. On utilise une machine thermique, fonctionnant avec  $n$  mol d'un fluide assimilable à un gaz parfait, de capacité thermique molaire à pression constante  $C_{P,m} = 30$  J.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>. Au cours d'un cycle, le fluide reçoit les transferts thermiques  $Q_f > 0$  de la source froide (le local) et  $Q_c < 0$  de la source chaude (extérieur), ainsi que le travail  $W > 0$ .

On modélise le cycle suivi par le fluide :

- ▷  $A \rightarrow B$  : Compression adiabatique réversible de la température  $T_f$  à  $T'_c = 350$  K.
- ▷  $B \rightarrow C$  : Refroidissement isobare de la température  $T'_c$  à la température  $T_c$ .
- ▷  $C \rightarrow D$  : Détente adiabatique réversible de la température  $T_c$  à la température  $T'_f$ .
- ▷  $D \rightarrow A$  : échauffement isobare de la température  $T'_f$  à la température  $T_f$ .

1. Représenter l'allure du cycle dans le diagramme de Watt  $P(V)$ .
2. Expliquer par quel moyen on arrive à pomper de la chaleur à la source froide et à la fournir à la source chaude.
3. Exprimer les variations d'entropie du fluide ( $n$  mol) au cours de chacune des transformations qu'il subit en fonction de  $n$ ,  $C_{P,m}$ ,  $T_f$ ,  $T_c$ ,  $T'_f$  et  $T'_c$ . En déduire l'expression de la variation d'entropie du fluide au cours du cycle en fonction de  $n$ ,  $C_{P,m}$ ,  $T_f$ ,  $T_c$ ,  $T'_f$  et  $T'_c$ . En déduire une relation simple entre  $T_f$ ,  $T_c$ ,  $T'_f$  et  $T'_c$ . On obtient ainsi  $T'_f = 270$  K.
4. établir l'expression du transfert thermique  $Q'_c$  reçu par le fluide au cours de la transformation de  $B$  à  $C$  en fonction de  $n$ ,  $C_{P,m}$  et certaines températures. établir l'expression du transfert thermique  $Q'_f$  reçu par le fluide au cours de la transformation de  $D$  à  $A$  en fonction de  $n$ ,  $C_{P,m}$  et certaines températures. En déduire l'expression du travail  $W'$  reçu par le fluide au cours du cycle.
5. Exprimer puis calculer la nouvelle efficacité thermodynamique  $e'$  de la machine. Comparer à  $e_C$ . La conclusion était-elle prévisible ?

Remarque : Ce fonctionnement pourrait aussi être celui d'une pompe à chaleur, si l'objectif n'était plus de refroidir la source froide, mais plutôt de réchauffer la source chaude.

## Exercice 3 - Pompe à chaleur

### Récepteur

Soit une pompe à chaleur, dont l'objectif est de fournir une puissance thermique  $|\dot{Q}_c| = 5$  kW à l'intérieur de la maison pour maintenir sa température à  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  (ceci compense les pertes thermiques de la maison, via les murs et les fenêtres). Il faut pour cela fournir une puissance  $P$  à la pompe (puissance qui vient du réseau électrique).

Dehors il faut plutôt froid :  $T_{ext} = 0^\circ\text{C}$ .

1. Faire un schéma de principe de la pompe, sur lequel figurent les échangeurs thermiques et le travail, tous comptés comme reçus par le fluide circulant dans la pompe.
2. Que faut-il supposer pour que l'efficacité de la pompe soit maximale ? Sous cette hypothèse, calculer son efficacité.
3. En déduire la puissance  $P$  consommée par l'utilisateur, ainsi que la puissance thermique  $\dot{Q}_f$  extraite au milieu extérieur.

4. Pour quelles valeurs des températures l'efficacité réversible est-elle maximale ? Commentaire ?
5. La pompe à chaleur réelle présente des irréversibilités : la puissance fournie n'est pas exploitée de façon optimale pour atteindre l'objectif. L'efficacité est plutôt de l'ordre de 3.

En déduire alors les véritables valeurs de la puissance consommée  $P$  et de  $\dot{Q}_f$ .