

## TD 21 : Machines thermiques

**1 Moteur réel**

Un moteur réel fonctionnant entre deux sources de chaleur, l'une à  $T_{fr} = 400\text{ K}$ , l'autre à  $T_{ch} = 650\text{ K}$ , produit 500 K par cycle, pour 1500 J de transfert thermique fourni.

1. Comparer son rendement à celui d'une machine de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources.
2. Calculer l'entropie créée par cycle, notée  $S_c$ .
3. Montrer que la différence entre le travail fourni par la machine de Carnot et la machine réelle est égale à  $T_{fr}S_c$ , pour une dépense identique.

**2 Perte de performance d'un congélateur**

Un congélateur neuf a un coefficient d'efficacité  $e = 2,0$ . Un appareil dans lequel on a laissé s'accumuler une couche de glace a une efficacité réduite. On suppose que l'effet de la couche de glace est de multiplier par 2 l'entropie créée pour un même transfert thermique pris à la source froide. L'intérieur du congélateur est à  $-20^\circ\text{C}$  et la pièce dans laquelle il se trouve à  $19^\circ\text{C}$ .

1. Calculer numériquement  $\alpha$ , rapport entre l'efficacité du congélateur neuf et l'efficacité d'une machine réversible fonctionnant avec les mêmes sources.
2. Montrer que ce rapport devient, pour le réfrigérateur usagé :  $\alpha' = \alpha/(2 - \alpha)$ . Calculer  $\alpha'$  et l'efficacité réduite  $e'$ .

**3 Optimisation du chauffage d'un local**

On souhaite maintenir la température d'un local à  $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$  alors que la température extérieure est  $\theta_2 = -2^\circ\text{C}$ . L'énergie thermique nécessaire est de 32 MJ par heure. Par un système de chauffage central, on brûle  $a$  litres de fuel par jour ( $a$  est de l'ordre de 25 litres, sa valeur exacte n'intervient pas dans l'exercice).

1. On utilise une pompe à chaleur fonctionnant réversiblement entre le local et l'extérieur, le fuel servant à faire fonctionner le moteur de cette pompe, comme nous le décrit la question 2. Calculer l'efficacité de la pompe à chaleur. En déduire la puissance consommée par le moteur de cette pompe.
2. Deux conseillers proposent chacun un dispositif qu'ils déclarent thermodynamiquement plus avantageux que le chauffage central :
  - dispositif du conseiller 1 : les  $a$  litres de fuel sont brûlés, l'énergie thermique  $Q$  récupérée permet d'assurer la vaporisation de l'eau d'une chaudière auxiliaire à la température  $\theta_3 = 210^\circ\text{C}$  qui sert de source chaude à un moteur ditherme réversible dont la source

froide est le local, le travail fourni servant à faire fonctionner la pompe à chaleur étudiée à la question 1 ;

- dispositif du conseiller 2 : le principe est le même mais la chaudière auxiliaire est à la température  $\theta_4 = 260^\circ\text{C}$  et le moteur fonctionne entre cette chaudière et l'air extérieur.

Dans les deux cas, on suppose que toute l'énergie thermique  $Q$  obtenue par combustion du fuel est fournie par la chaudière auxiliaire au fluide du moteur.

**2.a.** Dans les deux cas, calculer la durée  $\Delta t$  (en jours) pendant lequel le chauffage sera assuré avec les  $a$  litres de fuel.

**2.b.** Lequel de ces deux systèmes est le plus économique ? Le système le plus économique tire-t-il son avantage de la température à laquelle fonctionne la chaudière auxiliaire ou cet avantage se maintient-il pour  $\theta_3 = \theta_4$  ? Expliquer.

**2.c.** La durée de chauffage, pour une quantité de fuel donnée, augmentant avec la température de la chaudière auxiliaire, un troisième conseiller prétend qu'il pourra, en utilisant le même dispositif, augmenter la durée de chauffage. A-t-il tort ou raison ? Pourquoi ?

## 5 4 Moteur de Stirling

On considère  $n = 40 \cdot 10^{-3}$  mol d'air, considéré comme un gaz parfait de rapport  $\gamma = C_P/C_V$  constant et égal à 1,4, subissant un cycle modélisé par les évolutions suivantes à partir de l'état  $A$  :  $P_1 = 1$  bar et  $T_1 = 300$  K :

- compression isotherme réversible au contact de la source  $T_{H1}$  à  $T_1$ , jusqu'à l'état  $B$ , de volume  $V_2 = V_1/10$ ,
- échauffement isochore au contact thermique de la source  $T_{H2}$  à  $T_2 = 600$  K jusqu'à l'état  $C$  de température  $T_2$ ,
- détente isotherme réversible au contact de la source  $T_{H2}$  jusqu'à l'état  $D$  de volume  $V_1$ ,
- refroidissement isochore au contact thermique de la source  $T_{H1}$  jusqu'à l'état  $A$ .

1. Calculer les valeurs numériques de  $P$ ,  $V$  et  $T$  pour chacun des états  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$ .
2. Représenter le cycle dans le diagramme de Clapeyron ( $P, V$ ). Comment peut-on, sans calcul, savoir si le cycle proposé est celui d'un moteur ou d'un système mécaniquement récepteur ?
3. Calculer pour chaque étape le transfert thermique et le travail reçu par le fluide.
4. Commenter ces résultats. A-t-on bien un cycle moteur ?
5. Quel est, sur le plan énergétique, la production de ce système sur un cycle ? Quel est le coût sur le plan énergétique ? En déduire l'expression et la valeur du rendement.
6. Calculer l'entropie créée par irréversibilité au sein du système au cours du cycle. Quel type d'irréversibilité entre en jeu ici ?

L'invention des frères Stirling (1816) a permis d'améliorer considérablement le rendement de la machine précédente. Leur idée est de faire en sorte que le gaz échange du transfert thermique

au cours des transformation  $BC$  et  $DA$ , non pas avec  $T_{H1}$  et  $T_{H2}$ , mais avec un système appelé régénérateur  $RG$  n'ayant aucun échange d'énergie avec l'extérieur autre que les échanges avec les gaz au cours des transformations  $BC$  et  $DA$ .

7. Justifier l'idée des frères Stirling.

8. Quelle est dans ces nouvelles conditions le rendement ? Ce rendement peut-il être encore amélioré sans changer les sources ?

## 6 **5 Machine à vapeur : cycle de Rankine**

Dans une machine à vapeur, l'eau décrit un cycle de Rankine :

- dans l'état  $A$  l'eau est à l'état de liquide saturant seul, dans les conditions de pression et température  $P_1 = 0,2 \text{ bar}$  et  $T_1 = 60^\circ\text{C}$ ,
- transformation  $AB$  : l'eau est comprimée de façon adiabatique et isentropique dans une pompe, jusqu'à la pression  $P_2 = 15 \text{ bar}$ ,
- transformation  $BC$  : l'eau est injectée dans la chaudière et s'y réchauffe de manière isobare jusqu'à la température  $T_2 = 200^\circ\text{C}$ , telle que  $P_{\text{sat}}(T_2) = P_2$ ,
- transformation  $CD$  : l'eau se vaporise entièrement à la température  $T_2$ ,
- transformation  $DE$  : la vapeur est admise dans le cylindre à  $T_2$  et  $P_2$  et effectue une détente adiabatique et isentropique jusqu'à la température  $T_1$ , on obtient un mélange liquide-vapeur,
- transformation  $EA$  : le piston chasse le mélange liquide-vapeur dans le condenseur où il se liquéfie totalement.

1. Représenter le cycle précédent sur le diagramme  $(P, h)$  ci-après.

2. Déduire de valeurs lues sur le diagramme le transfert thermique pour chaque transformation du cycle.

3. Calculer le rendement de ce moteur et le comparer au rendement de Carnot. Quelles sont les causes d'irréversibilité ?

