

## TD d'application : Machines thermiques



### I Pompe à chaleur domestique

On veut maintenir la température d'une maison à  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  alors que la température extérieure est égale à  $T_2 = 5^\circ\text{C}$ , en utilisant une pompe à chaleur. L'isolation thermique de la maison est telle qu'il faut lui fournir un transfert thermique égal à 200 kJ par heure pour cet effet.

- 1 Rappeler le schéma de principe d'une pompe à chaleur ditherme et le sens réel des échanges d'énergie du fluide caloporteur.
- 2 Quel doit être le cycle thermodynamique suivi par le fluide pour que l'efficacité de la pompe à chaleur soit maximale ?
- 3 Démontrer et calculer l'efficacité théorique maximale de la pompe dans ces conditions. Montrer qu'elle ne dépend que de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Quel est le sens physique de l'efficacité ?
- 4 En déduire la puissance électrique minimale consommée par la pompe à chaleur.
- 5 En supposant la température intérieure imposée, pour quelle température extérieure l'efficacité est-elle maximale ?



### II Rafraîchir sa cuisine en ouvrant son frigo

Un réfrigérateur est une machine thermique à écoulement, dans laquelle un fluide subit une série de transformations thermodynamiques cyclique. À chaque cycle, le fluide extrait de l'intérieur du frigo un transfert thermique  $|\mathcal{Q}_{\text{int}}|$ , cède un transfert thermique  $|\mathcal{Q}_{\text{ext}}|$  à la pièce dans laquelle se trouve le frigo et reçoit un travail  $|\mathcal{W}|$  fourni par un moteur électrique.

On fait l'hypothèse que l'intérieur du réfrigérateur et l'air ambiant constituent deux thermostats aux températures respectives  $T_{\text{int}} = 268\text{ K}$  et  $T_{\text{ext}} = 293\text{ K}$ , et qu'en dehors des échanges avec ces thermostats les transformations sont adiabatiques.

- 1 Quel est le signe des énergies échangées ?
- 2 Lorsqu'il fait très chaud en été, est-ce une bonne idée d'ouvrir la porte de son frigo pour refroidir sa cuisine ? Pourquoi ?
- 3 Quelle est la différence avec un climatiseur ?



### III Moteur à explosion – cycle de Beau de ROCHAS

Dans un moteur à explosion,  $n$  moles de gaz parfait subit le cycle de BEAU DE ROCHAS, composé de deux adiabatiques et de deux isochores :

- ◇ compression adiabatique de l'état  $(P_1, V_1, T_1)$  à l'état  $(P_2, V_2, T_2)$  ;
- ◇ échauffement isochore de l'état  $(P_2, V_2, T_2)$  à l'état  $(P_3, V_3, T_3)$  ;
- ◇ détente adiabatique de l'état  $(P_3, V_3, T_3)$  à l'état  $(P_4, V_4, T_4)$  ;
- ◇ refroidissement isochore qui ramène le fluide à l'état initial.

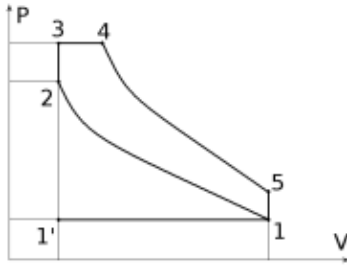
Les transformations sont supposées quasi-statiques.

- 1 Représenter le cycle dans un diagramme de WATT  $(P, V)$ .
- 2 Exprimer les travaux et transferts thermiques au cours des différentes étapes en fonction  $n, R, \gamma$  et des températures. En déduire le rendement théorique  $r$  de ce cycle en fonction des températures  $T_1, T_2, T_3$  et  $T_4$ .
- 3 En déduire l'expression de  $r$  en fonction du rapport volumétrique  $x = \frac{V_1}{V_2}$  et du coefficient adiabatique  $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$  du fluide.
- 4 Le piston du cylindre où évolue l'air ( $\gamma = 1,4$ ) a une course  $\ell = 10\text{ cm}$ , une section  $S = 50\text{ cm}^2$  et emprisonne un volume d'air de  $100\text{ cm}^3$  en fin de compression. Calculer :
  - a – le rendement théorique du cycle ;
  - b – le travail fourni au cours d'un cycle, si l'air est admis à une pression de 1 bar et à 300 K et si la température maximale est de 900 K.



## IV Moteur Diesel à double combustion

Dans les moteurs Diesel à double combustion, le cycle décrit par le mélange air-carburant est modélisable par celui d'un système fermé représenté en coordonnées de WATT ci-après.



Après la phase d'admission  $1' \rightarrow 1$  qui amène le mélange au point 1 du cycle, celui-ci subit une compression adiabatique supposée réversible jusqu'au point 2. Après injection du carburant en 2, la combustion s'effectue d'abord de façon isochore de 2 à 3 puis se poursuit de façon isobare de 3 à 4. La phase de combustion est suivie d'une détente adiabatique à nouveau prise réversible de 4 à 5, puis d'une phase d'échappement isochore  $5 \rightarrow 1$  puis isobare  $1 \rightarrow 1'$ .

Au point 1 du cycle, la pression  $p_m = 1,0$  bar et la température  $T_m = 293$  K sont minimales. La pression maximale, aux points 3 et 4, est  $p_M = 60$  bar et la température maximale, au point 4, vaut  $T_M = 2073$  K. Le rapport volumétrique de compression vaut  $\beta = V_M/V_m = 17$ .

On suppose que le mélange air-carburant se comporte exactement comme l'air, c'est-à-dire comme un gaz parfait diatomique de masse molaire  $M = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ , et de capacités thermiques respectives  $C_P$  et  $C_V$ .

- 1 Exprimer les températures  $T_2$ ,  $T_3$  et  $T_5$  en fonction de  $p_m$ ,  $p_M$ ,  $T_m$ ,  $T_M$  et  $\beta$ . Calculer les valeurs numériques.
- 2 Calculer le transfert thermique massique  $q_C$  reçu par l'air au cours de la phase de combustion  $2 \rightarrow 4$ .
- 3 Calculer le transfert thermique massique  $q_F$  échangé avec le milieu extérieur entre les points 5 et 1.
- 4 En déduire le travail massique  $w$  échangé au cours d'un cycle.
- 5 Définir et calculer le rendement de ce moteur. Commenter la valeur trouvée.

# TD d'entraînement : Machines thermiques



## I Coût énergétique d'un goûter

Pour préparer le goûter de fin d'année avec vos professeures, vous achetez six bouteilles de 1 L de différents jus que vous rangez dans votre réfrigérateur. Une heure plus tard, elles sont à la température du frigo.

### Données

- ◇ L'efficacité thermodynamique du réfrigérateur vaut 70% de l'efficacité de CARNOT ;
- ◇ L'isolation imparfaite du réfrigérateur se traduit par des fuites thermiques de puissance 10 W ;
- ◇ Tarifs électricité : 1 kWh coûte 0,20 €.

1 Combien vous coûte ce refroidissement ?



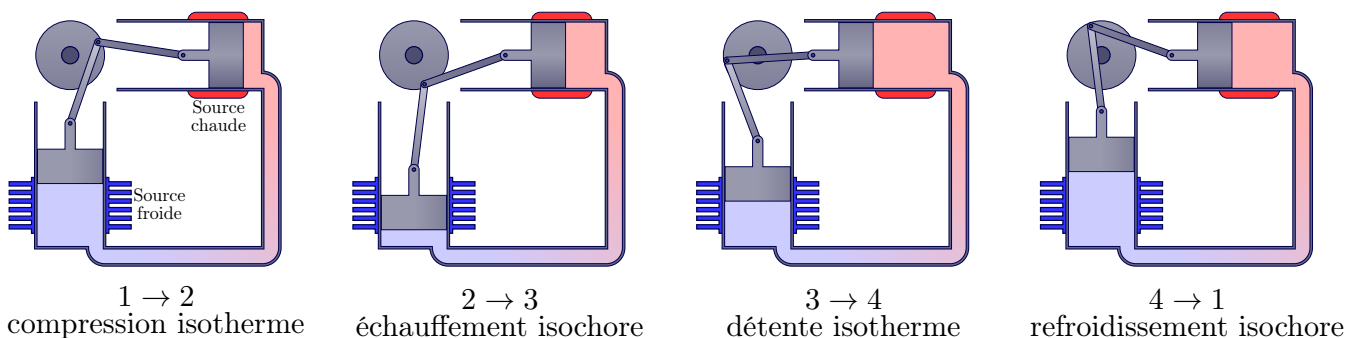
## II Étude d'un moteur de STIRLING

Le moteur de STIRLING est constitué de deux chambres, une chaude et une froide, reliées par un régénérateur de volume constant pouvant être constitué de fils de cuivre tressés. Le gaz, en circuit fermé, reçoit un transfert thermique d'une source chaude (par exemple une chaudière à combustion) et cède un transfert thermique à la source froide (par exemple l'atmosphère).

Le rôle du régénérateur, base de l'invention de Robert STIRLING, est fondamental pour obtenir une bonne efficacité. Dans son brevet original de 1816, STIRLING explique que le gaz chaud entre dans la partie chaude du régénérateur et est progressivement refroidi durant son parcours pour ressortir par l'autre extrémité à une température presque identique à la température de la source froide.

Dans le parcours inverse, le gaz est progressivement réchauffé. Cette astuce technologique permet d'avoir une partie des échanges thermiques internes au moteur. On considérera le cycle parcouru par  $n = 40$  mmol d'air, considéré comme un gaz parfait de rapport isentropique  $\gamma = 1,4$ .

Dans un premier temps, on néglige le régénérateur : les deux chambres ne font qu'une. Le cycle de STIRLING est alors modélisable par la succession de deux isothermes et deux isochores à partir d'un état 1 ( $P_1 = 1$  bar,  $T_1 = 300$  K). Il est décrit comme suit :



- ◇ 1 → 2 : compression isotherme réversible à  $T_F = T_1$  jusqu'à l'état 2, où  $V_2 = V_1/10$  ;
- ◇ 2 → 3 : échauffement isochore au contact de la source chaude à  $T_C = 600$  K jusqu'à l'état 3 de température  $T_3 = T_C$  ;
- ◇ 3 → 4 : détente isotherme réversible au contact de la source chaude à  $T_C$ , jusqu'à l'état 4 de volume  $V_4 = V_1$  ;
- ◇ 4 → 1 : refroidissement isochore au contact de la source froide jusqu'à revenir à l'état 1.

1 Calculer les valeurs numériques de  $P, V, T$  pour chacun des quatre états.

2 Représenter ce cycle dans un diagramme de WATT ( $P, V$ ). Justifier alors sans calculer que ce cycle est moteur.

- 3] Calculer pour chaque étape le travail et le transfert thermique reçus par le gaz. Commenter ces résultats : a-t-on bien un cycle moteur ?
- 4] Quel est, sur le plan énergétique, la production de ce système sur un cycle ? Quel est le coût énergétique ? En déduire l'expression du rendement en fonction de  $T_C$ ,  $T_F$ ,  $\gamma$  et le rapport  $V_1/V_2$ . Application numérique.
- 5] Calculer l'entropie créée au sein du système au cours du cycle. Quel type d'irréversibilité entre en jeu ?

L'invention du régénérateur par STIRLING a permis d'améliorer considérablement le rendement de la machine précédente. Son idée est de faire en sorte que le gaz échange du transfert thermique au cours des transformations  $2 \rightarrow 3$  et  $4 \rightarrow 1$  non pas avec les thermostats, mais avec un système qui n'échange de l'énergie qu'avec les gaz au cours de ces transformations.

- 6] Justifier la pertinence de l'idée de STIRLING.
- 7] Que vaut le rendement dans ces conditions ? Ce rendement peut-il être amélioré sans changer les sources ?



### III Cycle moteur de RANKINE

Un moteur fonctionne avec une masse  $m$  d'eau. Cette masse d'eau subit les transformations suivantes :

- ◇ AB : isotherme (A liquide saturant à  $T_1$  et  $P_1$  ; B à  $P_2$ ) ;
- ◇ BC : échauffement réversible isobare qui amène l'eau à la température  $T_2$  (C liquide saturant) ;
- ◇ CD : vaporisation totale sous la pression  $P_2$  et à la température  $T_2$  ;
- ◇ DE : détente adiabatique réversible jusqu'à la température  $T_1$  ;
- ◇ EA : liquéfaction totale à la température  $T_1$ .

La capacité thermique massique de l'eau liquide vaut  $c_{\text{liq}} = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Dans le tableau suivant, on donne les caractéristiques des points se trouvant sur la courbe de saturation aux pressions  $P_1$  et  $P_2$ .

	$P$ (bar)	$T$ (K)	$v_\ell$ ( $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$v_g$ ( $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$h_\ell$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$h_g$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
$P_1$	0,250	338,15	$1,02 \times 10^{-3}$	6,202	272,02	2618,4
$P_2$	1,208	378,15	$1,05 \times 10^{-3}$	1,419	440,17	2683,7

La variation d'entropie massique d'un liquide pour une transformation d'une température  $T_A$  à une température  $T_B$  s'exprime

$$\Delta s_{\text{AB}} = s_B - s_A = c_{\text{liq}} \ln\left(\frac{T_B}{T_A}\right)$$

La variation d'entropie massique lors d'un changement d'état est :

$$\Delta s = \frac{\Delta h}{T}$$

avec  $\Delta h$  la variation d'enthalpie massique lors du changement d'état et  $T$  la température du changement d'état.

- 1] Tracer l'allure de deux isothermes d'ANDREWS dans le diagramme de CLAPEYRON. On fera apparaître la courbe de saturation. Dessiner l'allure du cycle sur ce même diagramme.
- 2] a – Montrer que la variation  $s_B - s_A$  est nulle.  
 b – Exprimer  $s_C - s_B$  en fonction de  $c_{\text{liq}}$ ,  $T_1$  et  $T_2$ .  
 c – Exprimer  $s_D - s_C$  en fonction de  $h_g(T_2)$ ,  $h_\ell(T_2)$  et  $T_2$ .  
 d – Calculer  $s_E - s_D$ .
- 3] Énoncer le théorème des moments.
- 4] Soit  $x$  la fraction massique de vapeur en E. On admet que l'on peut appliquer le théorème des moments pour l'entropie. Déterminer  $x$  littéralement puis numériquement.
- 5] Calculer les transferts thermiques massiques échangés lors des transformations BCD et EA.
- 6] Déterminer le rendement du cycle. Application numérique.