

## TD Thermodynamique 04 : Machines thermiques

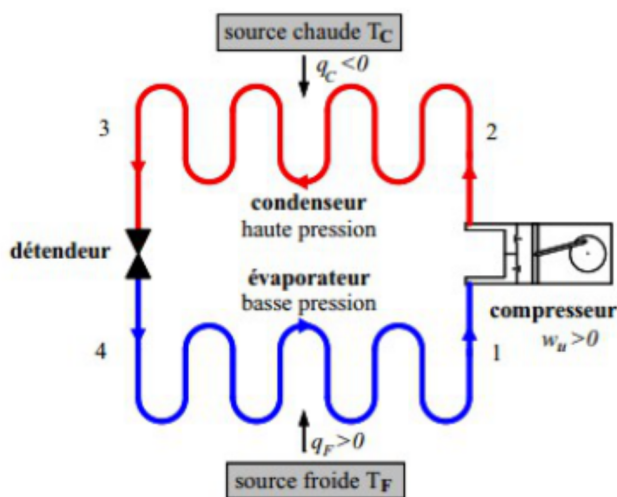
### Exercice 1 – Bilan thermodynamique d'une machine thermique

On considère une mole de dioxyde de carbone initialement à la température  $T_1 = 100\text{ °C}$  contenue dans un récipient de volume  $V_1 = 1,0\text{ L}$  sous la pression  $P_1$  (état A). On effectue d'abord une détente adiabatique réversible qui amène le gaz à une température  $T_2$  et un volume  $V_2 = 10 V_1$  (état B). On effectue ensuite une compression isotherme réversible qui ramène le gaz à la pression  $P_1$  (état C). On réchauffe alors le gaz jusqu'à la température  $T_1$  à pression constante. On assimilera le gaz carbonique à un gaz parfait de coefficient isentropique  $\gamma = 4/3$ .

1. Tracez le cycle correspondant sur un diagramme de Watt.
2. Identifiez au cours de quelles transformations se font les échanges thermiques avec la source chaude et la source froide. Quelle est la température de la source chaude ? Quelle est la température de la source froide ?
3. Calculez la pression initiale  $P_1$  et la température  $T_2$ .
4. Déterminez les transferts thermiques reçus par le gaz au cours de chacune des transformations.
5. Déterminez le travail reçu par le système.
6. Calculez le rendement de ce moteur et comparez ce rendement à celui qui serait obtenu entre ces deux mêmes sources pour un cycle réversible de Carnot. Quelle transformation est la plus nuisible pour le rendement ?

### Exercice 2 – Détermination d'une efficacité par lecture graphique

Une machine frigorifique est utilisée afin de maintenir un local contenant des denrées périssables à  $0\text{ °C}$ . Cette machine contient un fluide frigorigène de type Fréon dont le diagramme Température-Entropie massique ( $T, s$ ) est donné en annexe. Le mélange liquide-vapeur est situé dans la zone centrale sous la courbe de saturation. Sur ce diagramme apparaissent les isobares et les isenthalpes. Cette machine ditherme qui fonctionne en régime permanent échange de la chaleur avec une source chaude à  $40\text{ °C}$  (atmosphère extérieure) et une source froide à  $0\text{ °C}$  (local réfrigéré). Le schéma général de fonctionnement avec le sens de circulation du fluide est présenté ci-contre. Compte-tenu du faible débit du Fréon circulant dans les tuyauteries de la machine, les variations d'énergie cinétique seront négligées dans tout le problème. Le cycle décrit par le Fréon présente les caractéristiques suivantes :



- La compression de 1 à 2 est adiabatique réversible
- Le passage dans les deux échangeurs (condenseur et évaporateur) est isobare (de 2 à 3 et de 4 à 1)
- La vanne est considérée comme un tuyau indéformable et ne permettant pas les échanges de chaleur. La détente y est isenthalpique.
- La température du Fréon lors de l'évaporation dans l'évaporateur est de  $-10\text{ °C}$ .
- La pression de fin de compression en 2 est 15 bars.
- Le point 3 est du liquide saturé.
- La quantité de chaleur échangée dans l'évaporateur avec le local permet une évaporation complète du Fréon venant de 4 et conduit la vapeur de façon isobare jusqu'à la température de  $-10\text{ °C}$  (point 1, point saturé).

1. Placez les 4 points du cycle 1, 2, 3, 4 sur le diagramme, représentez-y le cycle et déterminez par lecture graphique et interpolation linéaire sur le diagramme les valeurs de  $P$ ,  $T$ ,  $h$  et  $s$  en ces différents points. Regroupez ces résultats dans un tableau.
2. Comment peut-on trouver, de deux façons différentes, sur le diagramme la valeur de la chaleur latente massique  $l_v$  de vaporisation du Fréon à une température  $T_0$  donnée ? Déterminez celle-ci à la pression  $P_0 = 3\text{ bars}$ .
3. Calculez le titre  $x$  en vapeur du point 4 de la machine frigorifique. Peut-on définir un titre  $y$  en liquide ? Quelle est sa valeur en 3 ?
4. En utilisant les résultats de la première question, calculez les quantités de chaleur massique  $q_c$  et  $q_f$  échangées par le Fréon avec l'extérieur ( $q_c$  est échangée de 2 à 3 et  $q_f$  de 4 à 1). Calculez de même le travail absorbé au cours du cycle.
5. Déduisez-en l'efficacité de la machine frigorifique.

### Exercice 3 – Centrale thermique

Une centrale thermique fournit une puissance  $P = 1,0 \text{ GW}$ . Le fleuve qui lui sert de source froide est de température moyenne  $T_2 = 15^\circ\text{C}$  et possède le débit volumique  $D = 400 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . La température du cœur de la centrale est  $T_1 = 700\text{K}$ . On donne la capacité thermique massique de l'eau liquide  $c = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et  $\rho = 1,0\cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  la masse volumique de l'eau liquide.

1. Sachant que le rendement  $\eta$  de la centrale est égal à 60 % du rendement maximal de la machine qui fonctionnerait entre les deux mêmes sources, calculez le rendement de la centrale thermique.
2. Exprimez le transfert thermique reçu par le fleuve en une seconde.
3. Exprimez puis calculez alors l'élévation de température  $\Delta\theta$  de l'eau du fleuve au cours de sa traversée de la centrale.

### Exercice 4 – Machine à vapeur

On adopte le modèle de machine à vapeur suivant: un système fermé constitué de 1 kg d'eau sous deux phases liquide et vapeur décrit un cycle ABCDA. Les évolutions BC et DA sont adiabatiques et réversibles; les évolutions AB et CD sont isothermes et isobares. On note  $x$  le titre massique en vapeur. Les données concernant le cycle sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

	A	B	C	D
P (en bar)	20	20	1	1
T (en K)	485	485	373	373
$x$	0	1	0,83	0,19

On donne ci-dessous des extraits de tables thermodynamiques :

T (en K)	P (en bar)	$h_L$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) liquide juste saturé $x_v = 0$	$h_v$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) vapeur saturante sèche $x_v = 1$
485	20	909	2801
373	1	418	2676

1. Sachant que le rendement  $\eta$  de la centrale est égal à 60 % du rendement maximal de la machine qui fonctionnerait entre les deux mêmes sources, calculez le rendement de la centrale thermique.
2. Exprimez le transfert thermique reçu par le fleuve en une seconde.
3. Exprimez puis calculez alors l'élévation de température  $\Delta\theta$  de l'eau du fleuve au cours de sa traversée de la centrale.

### Exercice 5 – Rendement du moteur Diesel

Le cycle Diesel comporte quatre temps :

- 1<sup>er</sup> temps : admission de l'air seul  $A \rightarrow B$
- 2<sup>e</sup> temps : compression isentropique  $B \rightarrow C$
- 3<sup>e</sup> temps : introduction du combustible après la compression de l'air seul et échauffement isobare  $C \rightarrow D$  suivi d'une détente isentropique  $D \rightarrow E$
- 4<sup>e</sup> temps : refroidissement isochore  $E \rightarrow B$  puis échappement sous pression atmosphérique  $B \rightarrow A$

Déterminez le rendement du cycle Diesel en fonction du coefficient  $\gamma$  et des taux de compression  $a = V_B/V_C$  et  $b = V_E/V_D$ .

## Corrigés

### Exercice 1

1. A au volume  $V_1$ , pression  $P_1$   
B au volume  $V_2$   
C à la pression  $P_1$
2. Source chaude à  $T_1$  :  $C \rightarrow A$   
Source froide à  $T_2$  :  $B \rightarrow C$
3.  $P_1 = 3,1 \cdot 10^6 \text{ Pa}$  ;  $T_2 = 173 \text{ K}$
4.  $Q_{AB} = 0$   
 $Q_{BC} = -4,42 \text{ kJ}$   
 $Q_{CA} = 6,65 \text{ kJ}$
5.  $W = -2,23 \text{ kJ}$  Moteur
6.  $\eta = 33,6 \%$   
 $\eta_{\text{Carnot}} = 53,6 \%$

### Exercice 2

1.  $P_1 = 2,2 \text{ bar}$  ;  $P_2 = 15 \text{ bar}$   
 $P_3 = 15 \text{ bar}$  ;  $P_4 = 2,2 \text{ bar}$   
 $T_1 = -10 \text{ °C}$  ;  $T_2 = 70 \text{ °C}$   
 $T_3 = 59 \text{ °C}$  ;  $T_4 = -10 \text{ °C}$   
 $h_1 = 345 \text{ kJ.kg}^{-1}$  ;  $h_2 = 385 \text{ kJ.kg}^{-1}$   
 $h_3 = 260 \text{ kJ.kg}^{-1}$  ;  $h_4 = 260 \text{ kJ.kg}^{-1}$   
 $s_1 = s_2 = 1560 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$   
 $s_3 = 1200 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$   
 $s_4 = 1230 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
2.  $l_v = h_v - h_l = T_0 (s_v - s_l)$   
 $l_v = 150 \text{ kJ.kg}^{-1}$
3.  $y = 0$  en 3 ;  $x = 43 \%$  en 4
4.  $q_C = -125 \text{ kJ.kg}^{-1}$  ;  $q_F = 85 \text{ kJ.kg}^{-1}$
5.  $e = 2,1$

### Exercice 3

1.  $\eta = 35 \%$
2.  $Q_2 = 1,86 \text{ GJ}$
3.  $\Delta\theta = 1,1 \text{ °C}$

### Exercice 4

- 1.
2.  $h_C = 2292 \text{ kJ.kg}^{-1}$   
 $h_D = 847 \text{ kJ.kg}^{-1}$
3.  $q_{AB} = 1892 \text{ kJ.kg}^{-1}$   
 $q_{CD} = -1445 \text{ kJ.kg}^{-1}$   
 $w = -447 \text{ kJ.kg}^{-1}$
4.  $\eta = 23 \%$  Cycle réversible

### Exercice 5

$$\eta = 1 + \frac{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^y}{y \left(\frac{a^y}{b} - a^{y-1}\right)}$$

