Chapitre 11 : Machines thermiques

I Les différents types de machine thermique

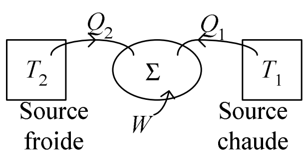
A) Introduction

Définition : une machine thermique est un système permettant d'échanger travail et chaleur.

On s'intéresse à un système thermodynamique en fonctionnement cyclique.

Cycles monothermes : $W \rightarrow Q$ (Kelvin)

Cycles dithermes, schéma symbolique :



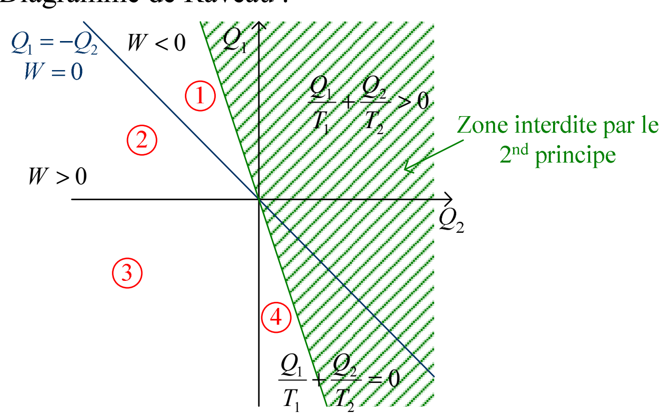
($T_1 > T_2$)

B) Application des deux principes au fonctionnement du système

1^er principe : $\Delta U = W + Q_1 + Q_2 = 0$ (cycle)

2^nd principe : inégalité de Clausius $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$

Diagramme de Raveau :



Zone 1 : $W < 0$, $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$

Le système reçoit Q_1 et le transforme en travail $-W$ et chaleur $-Q_2$ cédés au milieu extérieur et à la source froide. Ce type de système est appelé un moteur thermique.

Zone 2 : $W > 0$, $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$

Type de fonctionnement inutile : on fournit un travail pour faire un transfert de chaleur d'une source chaude vers une source froide.

Zone 3 : $W > 0$, $Q_1 < 0$, $Q_2 < 0$

Fonctionnement aussi inutile : un cycle monotherme suffit pour transformer du travail en chaleur.

Zone 4 : $W > 0$, $Q_1 < 0$, $Q_2 > 0$

Transfert de chaleur d'une source froide vers une source chaude grâce à un travail. Ce type de système est une machine frigorifique.

II Moteur thermique

A) Théorème de Carnot

Le rendement r d'un moteur réel est inférieur au rendement $r_{\text{rév}}$ du moteur réversible fonctionnant entre les deux mêmes sources de chaleur.

$r < r_{\text{rév}}$ et $r_{\text{rév}} = 1 - \dfrac{T_2}{T_1}$, quel que soit le principe de fonctionnement du moteur thermique.

Démonstration :

1er principe : $W + Q_1 + Q_2 = 0$

2nd principe : $\dfrac{Q_1}{T_1} + \dfrac{Q_2}{T_2} \leq 0$

Pour un moteur réversible, $\dfrac{Q_1}{T_1} + \dfrac{Q_2}{T_2} = 0$

$$r = \frac{-W}{Q_1}$$

$$r_{rév} = \frac{-W}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Si le cycle est irréversible :

$$r = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}, \text{ mais } \frac{Q_1}{T_1} < -\frac{Q_2}{T_2} \Leftrightarrow \frac{T_2}{T_1} < -\frac{Q_2}{Q_1} \ (Q_1 > 0) \Leftrightarrow \frac{Q_2}{Q_1} < -\frac{T_2}{T_1}$$

Donc $r < 1 - \dfrac{T_2}{T_1} = r_{\text{rév}}$

Exemple : centrale nucléaire

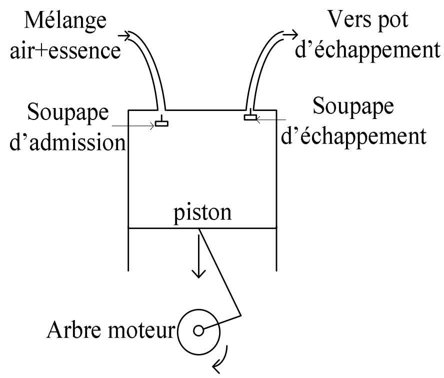
On considère comme système le sodium liquide. La source chaude est le cœur du réacteur, siège de la réaction de fission, la source froide est une rivière ou la mer.

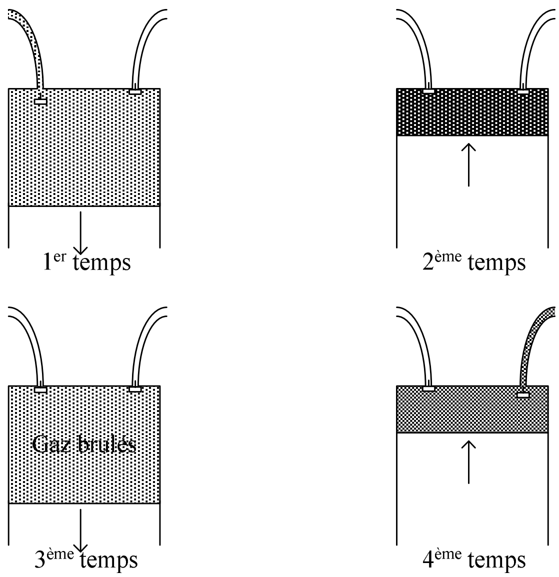
$T_1 = 700\text{K}$, $T_2 = 300\text{K}$

$r_{rév} = 1 - \dfrac{300}{700} = 57\%$ (Les 43% restant sont cédés à la source froide)

B) Moteur à explosion quatre temps

1) Principe de fonctionnement

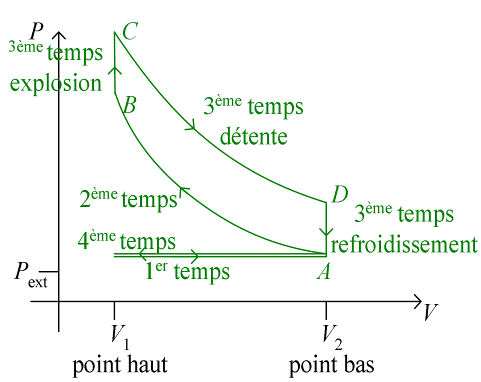




1er temps : admission du mélange air–essence
2ème temps : compression (adiabatique car rapide)
3ème temps : explosion et détente
4ème temps : échappement

Diagramme de Watt

Le système est le gaz situé à l'intérieur de la chambre de combustion (système non fermé, donc différent du diagramme de Clapeyron).



Cycle de Beau de Rochas (fonctionnement idéalisé du moteur à quatre temps)
1) admission à P constante
2) compression adiabatique, réversible (pour pouvoir la représenter)
3) explosion instantanée isochore puis détente adiabatique réversible
4) évacuation à P constante

2) Bilan énergétique

Seul le cycle *ABCDA* participe aux échanges énergétiques.

On considère le système air+essence dans la chambre de combustion, fermé (pendant le cycle) ; on considère ce mélange comme un gaz parfait, avec γ indépendant de T

$$AB : Q_{AB} = 0 \,(\text{adiabatique}) \quad W_{AB} = \Delta U_{AB} = nC_{m,V}(T_B - T_A) = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_B - T_A)$$

$$BC : Q_{BC} = \Delta U_{BC} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_C - T_B) \quad (\text{isochore}) \quad W_{BC} = 0$$

$$CD : Q_{CD} = 0 \,(\text{adiabatique}) \quad W_{CD} = \Delta U_{CD} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_D - T_C)$$

$$DA : Q_{DA} = \Delta U_{DA} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_A - T_D) \quad W_{DA} = 0$$

Pour le cycle :

$W = W_{AB} + W_{CD}$

$Q = Q_{BC} + Q_{DA}$

Q_{BC} : chaleur libérée par l'explosion de l'essence (payé)

Q_{DA} : chaleur cédée à la source froide (atmosphère extérieure)

$$r = \frac{-W}{Q_{BC}} = \frac{-\dfrac{nR}{\gamma - 1}(T_B - T_A + T_D - T_C)}{\dfrac{nR}{\gamma - 1}(T_C - T_B)} = 1 + \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B}$$

Les transformations *AB* et *CD* sont adiabatiques réversibles.

Donc, d'après la loi de Laplace, on a :

$TV^{\gamma - 1} = cte$

$$\frac{T_A}{T_B} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} = a^{1-\gamma} \quad (a : \text{rapport de compression volumétrique} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}})$$

$$\frac{T_D}{T_C} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} = a^{1-\gamma}$$

$$k = \frac{T_D}{T_C} = \frac{T_A}{T_B} \Rightarrow \frac{T_A}{T_B} = \frac{T_A(1-k)}{T_B(1-k)} = \frac{T_A - T_D}{T_B - T_C} = a^{1-\gamma} \Rightarrow \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B} = -a^{1-\gamma}$$

Donc $\boxed{r = 1 - a^{1-\gamma}}$

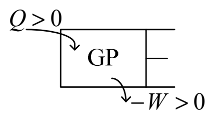
Application numérique :

Pour $a = 9$ et $\gamma = 1{,}4$ on a $r = 58{,}5\%$

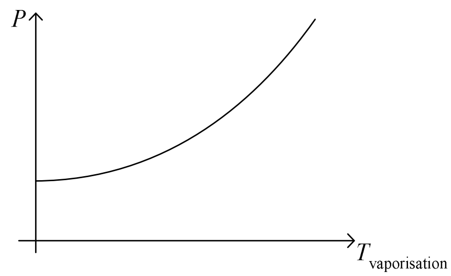
III Machines frigorifiques

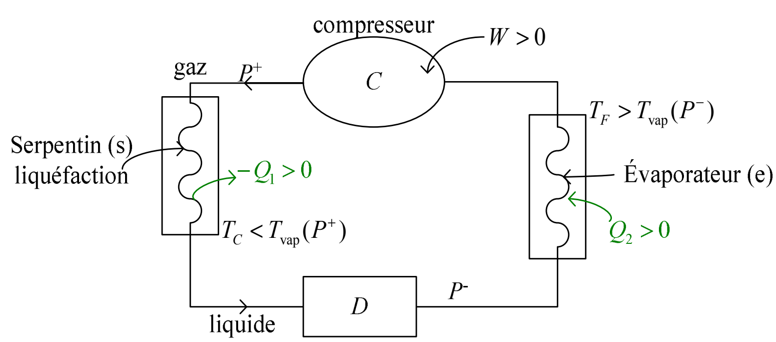
A) Principe de fonctionnement

Différents moyens de produire du « froid » :
Détente isotherme d'un gaz parfait



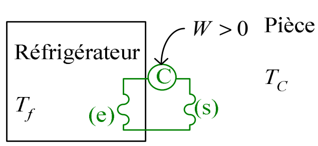
Vaporisation d'un liquide.
Principe : augmentation de T_{vap} avec la pression :





Le système étudié est un fluide existant sous forme liquide ou gazeuse

B) Réfrigérateur et climatiseur



Efficacité du réfrigérateur $\eta = \dfrac{Q_2}{W}$

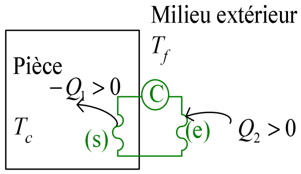
Pour un fonctionnement réversible :

$$\eta_{\text{rév}} = \frac{Q_2}{-Q_1 - Q_2} = \frac{1}{-\dfrac{Q_1}{Q_2} - 1} = \frac{1}{\dfrac{T_1}{T_2} - 1} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \left(= \frac{T_f}{\Delta T} \right)$$

Application numérique :
Pour T_2 = 260K (congélateur) et T_1 = 300K, on a $\eta_{\text{rév}} = 6{,}5 > 1$
Si la transformation est irréversible, $\eta < \eta_{\text{rév}}$

C) Pompe à chaleur

Utilisation d'une machine frigorifique pour chauffer un appartement.



Efficacité $\eta = \dfrac{-Q_1}{W} = \dfrac{Q_1}{Q_1 + Q_2} = \dfrac{1}{1 + \dfrac{Q_2}{Q_1}} = \dfrac{1}{1 - \dfrac{T_2}{T_1}} = \dfrac{T_1}{T_1 - T_2} \left(= \dfrac{T_c}{\Delta T} \right)$

Application numérique :
T_1 = 300K et T_2 = 280K, on a $\eta_{\text{rév}} = 15$