Les machines thermiques :

I) Machines thermiques monothermes, dithermes :

1) Description d'une machine thermique :

Système (ouvert ou fermé) qui subit des cycles de transformation.
- **échange de transferts thermiques avec des thermostats.**
  - **1 thermostat => machine monotherme**
  - **2 thermostats => machine ditherme**
- **échange de travail mécanique avec des systèmes mécaniques.**
  - **On compte + ce qui est reçu par S (grandeurs algébriques)**
  - **En général, les thermostats ont une température constante.**
  - **Lors du cycle, on aura contact pendant certaines phases avec les organes mécaniques et thermostats.**

On va s'intéresser à :
- **des moteurs** $W_{\text{total}} < 0$
- **des machines frigorifiques (utilisation d'un transfert thermique).**

2) Machine monotherme :

1er principe : $\Delta U_{cycle} = 0 = W + Q$, $W = -Q$
2ième principe : $\Delta S_{cycle} = 0 = S_{ech} + S_{créé}$

$0 = \frac{Q}{T_0} + S_{créé}$ $S_{créé} \geq 0$, $Q \leq 0$.

Conclusion : Une machine monotherme ne peut pas fournir de travail (pas de moteur monotherme).

3) Machine ditherme :

a) Inégalité de Clausius :

1ier principe sur S, $\Delta U_{cycle} = 0 = W + Q_C + Q_F$

$W = -(Q_F + Q_C)$

2ième principe :

$\Delta S_{cycle} = 0 = S_{ech} + S_{créé}$

$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} + S_{créé} = 0$

Si le cycle est réversible, $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0$

Cycle non réversible : $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} < 0$

b) <u>Diagramme de Raveau :</u> Fonctionnement général des machines dithermes

1) On trace $W=0=-Q_F-Q_C$, $Q_C=-Q_F$
Si $Q_C>-Q_F$, $Q_C+Q_F>0$, $W<0$ => Moteur
Si $Q_C<-Q_F$, alors $W>0$ => récepteur.
2) Inégalité de Clausius :
$$\frac{Q_C}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}\leq 0 \quad , \quad Q_C\leq -\frac{T_C}{T_F}Q_F$$
Voir schéma :
<u>Zone 1 :</u> Moteur ditherme.
W < 0 => fournit du travail mécanique
$Q_C>0$, $Q_F<0$
Le système reçoit Q_C de la source chaude et rejette $|Q_F|$ vers la source froide.
<u>Zone 2 :</u>
W > 0 => S reçoit du travail mécanique.
$Q_F<0,\ Q_F>0$ S fournit du travail à la source froide et reçoit du travail de la source chaude.
=> Pas très intéressant, autant faire un contact thermique direct.
<u>Zone 3 :</u>
W > 0 => S reçoit du travail.
$Q_F<0,\ Q_C<0$ On fournit du transfert thermique aux deux thermostats.
=> Pas très intéressant, autant utiliser deux machines monothermes.
<u>Zone 4 :</u>
W > 0 => S reçoit du travail.
$Q_F<0,\ Q_C>0$ On reçoit du transfert thermique de la source froide et on en fournit à la source chaude.

c) <u>Performances d'une machine ditherme :</u>

Moteur / machine frigorifique -> $W_{tot}<0$ récupéré par l'utilisateur.
frigo -> transfert thermique Qf prélevé à la source froide.
pompe à chaleur -> transfert thermique Qc restitué à la source chaude.
Il s'agit d'une grandeur intéressante, mais qui coûte de l'énergie.
Moteur Qc (apport source chaude = combustion de l'essence).
frigo Wtot -> travail de la pompe.
Pompe à chaleur -> idem

La performance énergétique est le rapport de la grandeur énergétique utile par la grandeur énergétique qui coûte.

Moteur -> rendement $\tau=-\frac{W_{tot}}{Q_C}$

Machine frigorifique : efficacité $e=\frac{-Q_C \text{ ou } Q_F}{W_{tot}}$

II) Moteur ditherme :

1) Cycle de Carnot ou moteur idéal :

S supposé fermé.
On veut un fonctionnement réversible.

- Pour chaque contact thermique avec thermostat => transformations isothermes.
- Wtot < 0 => cycle parcouru sens horaire.
- Pour fermer le cycle on utilise deux transformation adiabatiques réversibles

Cycle de Carnot :
Deux isothermes Tc et Tf, deux adiabatiques réversibles.
A -> B détente isotherme réversible.
B -> C détente adiabatique réversible.
C -> D compression isotherme réversible.
D -> A compression adiabatique réversible.

Bilan énergétique :
Système : Gaz parfait (γ) .
A -> B :

$$\Delta U_{A\to B}=0=W_{AB}+Q_{AB}$$.

$$W_{AB}=-Q_{AB}=-Q_C$$

$$W_{AB}=-\int_{V_A}^{V_B} p\,dV=-\int_{V_A}^{V_B}\frac{nRT_C}{V}dV=nRT_C\ln\frac{V_B}{V_A}$$

B -> C :

$$Q_{BC}=0 \quad , \quad \Delta U_{B\to C}=W_{BC}$$

$$Cv(T_F-T_C)=W_{BC}$$

C -> D :

$$W_{CD}=-Q_{CD}=-Q_F=nRT_F\ln\frac{V_C}{V_D}$$

$$Q_F=nRT_F\ln\frac{V_D}{V_C}$$

D -> A :

$$Q_{DA}=0$$

$$\Delta U_{D\to A}=W_{DA}=Cv(T_C-T_f)$$

Par ailleurs.
B -> C :

$$PV^\gamma=cste$$

$$T\,V^{\gamma-1}=cste$$

D -> A :

$$T_C V_B^{\gamma-1}=cste$$

$$T_F V_D^{\gamma-1}=T_C V_A^{\gamma-1}$$

$$\frac{V_C}{V_D}=\frac{V_B}{V_A}$$

d'où $-\frac{Q_F}{nRT_F}=\frac{Q_C}{nRT_C}$, $\frac{Q_F}{T_F}+\frac{Q_C}{T_C}=0$, égalité de Clausius.
=> Cycle réversible ($S_{créé}$ = 0).

Rendement : $\boldsymbol{r=-\frac{W_{tot}}{Q_C}}$

$$W_{tot}+Q_C+Q_F=\Delta U_{\text{cycle}}=0$$
$$W_{\text{tot}}=-(Q_C+Q_F)$$
$$r=\frac{Q_C+Q_F}{Q_C}=1+\frac{Q_F}{Q_C}$$
$$r=1-\frac{T_F}{T_C}\leq 1$$

Rendement de Carnot : $\boldsymbol{r_C=1-\frac{T_F}{T_C}}$

2) Moteur quelconque :

$$0=\Delta U_{\text{cycle}}=W_{\text{tot}}+Q_C+Q_F$$
$$0=\Delta S_{\text{cycle}}\geq\frac{Q_C}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}$$
$$W_{tot}=-Q_C-Q_F$$
$$Q_F\leq-\frac{T_F}{T_C}Q_C$$
$$r=-\frac{W_{tot}}{Q_C}=1+\frac{Q_F}{Q_C}$$
$$\boldsymbol{r\leq 1-\frac{T_F}{T_C}}$$

Théorème de Canot :
Tous les moteurs fonctionnant de manière réversible entre deux thermostats $\boldsymbol{T_C, T_F}$ **ont le même rendement appelé rendement de Carnot.** $\boldsymbol{r_C=1-\frac{T_F}{T_C}}$
Les moteurs fonctionnant entre les deux même thermostats de manière irréversible ont un rendement r < $\boldsymbol{r_{\text{Carnot}}}$.

Remarque : Lien avec la création d'entropie.

$$S_{\text{créé}}=\Delta S_{\text{cycle}}-S_{\text{ech}}=-\left(\frac{Q_C}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}\right)$$
$$\frac{Q_F}{Q_C}=-\frac{T_F S_{\text{créé}}}{Q_C}-\frac{T_F}{T_C}$$
$$r=1-\frac{T_F}{T_C}-\frac{T_F}{Q_C}S_{\text{créé}}$$
$$r-r_{\text{Carnot}}=-\frac{T_F}{Q_C}S_{\text{créé}}$$

Moteur à explosion :
Système réel : mélange air + essence subissant une réaction chimique et donc changeant de nature -> gaz brulés.

Hypothèse : S = air, gaz parfait évoluant en système fermé, réaction chimique modélisée par un thermostat (Qc).

Exercice : $\frac{V_{max}}{V_{min}}=\alpha$, déterminer le rendement du cycle de Beau de Rochas.

III) Exemples de machines dithermes réceptrices :

1) Machine frigorifique :

But : fournir un travail W > 0. Pour prendre Q_F à la source froide.

Efficacité : $e=\frac{Q_F}{W_{tot}}$

$$\Delta U_{\text{cycle}}=0=W+Q_C+Q_F$$
$$\Delta S_{\text{cycle}}=0\geq\frac{Q_C}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}$$
$$W_{\text{tot}}=-Q_C-Q_F$$
$$e=\frac{Q_F}{-Q_C-Q_F}=\frac{1}{-\frac{Q_C}{Q_F}-1}$$
$$\frac{Q_C}{Q_F}\leq-\frac{T_C}{T_F}$$
$$-\frac{Q_C}{Q_F}-1\geq\frac{T_C}{T_F}-1$$
$$e\leq\frac{1}{\frac{T_C}{T_F}-1}=\frac{T_F}{T_C-T_F}$$

Théorème de Carnot : Une machine frigorifique fonctionnant de manière réversible a une efficacité de Carnot $e_C=\frac{T_F}{T_C-T_F}$, fonctionnement irréversible : $e<\frac{T_F}{T_C-T_F}$.

Fonctionnement des machines frigorifiques :
Système : fluide frigorigène qui subit des changements d'état.

$$e=-\frac{Q_C}{W_{tot}}$$
$$W_{tot}=-Q_C-Q_F$$
$$e=\frac{-Q_C}{-Q_C-Q_F}=\frac{1}{\frac{Q_F}{Q_C}+1}$$

$$\frac{Q_C}{Q_F} \leq -\frac{T_C}{T_F}$$
$$-\frac{Q_F}{Q_C} \leq \frac{T_F}{T_C}$$
$$-\frac{Q_F}{Q_C} - 1 \leq \frac{T_F}{T_C} - 1$$
$$e \leq \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

<u>Théorème de Carnot :</u> Une pompe à chaleur fonctionnant de manière réversible a une efficacité de Carnot $\boldsymbol{e_C = \frac{T_C}{T_C - T_F}}$ **, fonctionnement irréversible.** $\boldsymbol{e < \frac{T_C}{T_C - T_F}}$

IV) Machines avec écoulement (système ouvert) :

1er principe :

$$\Delta U + \Delta E_{C_{macro}} + \Delta E_{P_{macro}} = W + Q$$

Cas où $E_{P_{macro}} = mgz$

$E_{C_{macro}} = \frac{1}{2} m c^2$ c : vitesse d'écoulement du fluide.

Évolution entre t et t + dt en régime permanent.

Bilan de matière.

$$m_{S(t+dt)} - m_{S(t)} = 0$$
$$m_{Vc(t)} = m_{Vc(t+dt)}$$
$$m_{\delta V_e} = m_{\delta V_s}$$
$$m_{\delta V_e} = Dm\, dt = m_{\delta V_s}$$

Dm masse circulant dans le circuit par unité de temps.