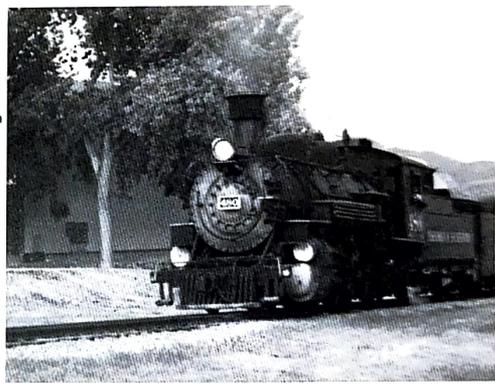
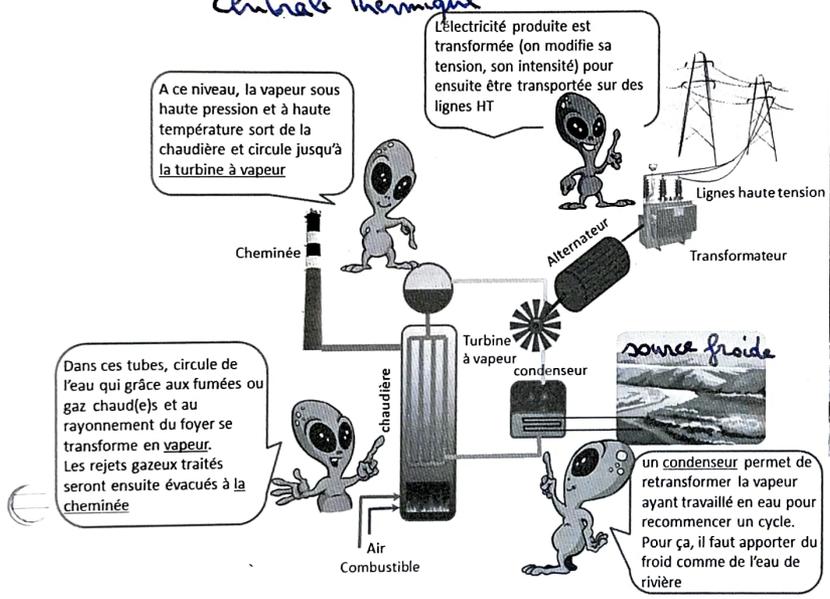


Thermodynamique

TH4 Machines thermiques

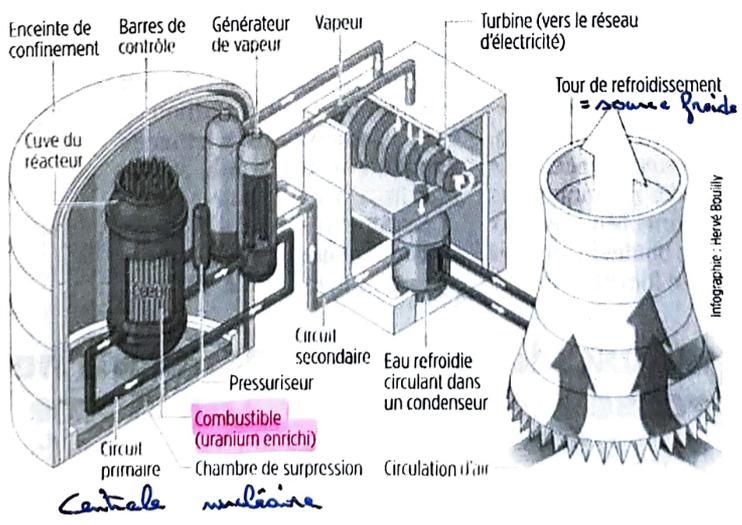
- I Généralités 2
 - 1.) Définitions 2
 - 2.) Machine monotherme 3
 - 3.) Généralités sur les machines dithermes 4
- II Moteurs thermiques 5
 - 1.) Fonctionnement 5
 - 2.) Rendement 6
- III Récepteurs thermiques 7
 - 1.) Fonctionnement 7
 - 2.) Efficacité 8
- IV Exemples de machines thermiques usuelles 9
 - 1.) Machine à vapeur 9
 - 2.) Les moteurs à combustion interne: 10
 - 3.) Récepteurs thermiques 12
- Conclusion : principe de la cogénération 12

Centrale thermique



Combustibles: charbon; fuel, biomasse.
 fluide: eau qui décrit des cycles.

Réacteur à eau pressurisée REP



I Généralités

1.) Définitions

Machine thermique : Système qui réalise une conversion d'énergie.
 Un fluide effectue des transformations cycliques au cours desquelles il y a échange énergétique entre la machine et le milieu extérieur.

Deux types de machines thermiques :

Moteur thermique : Transforme une partie de la chaleur qu'il reçoit en travail mécanique.

Récepteur thermique : Reçoit du travail pour refroidir ou chauffer une partie du système.

ex: moteurs

moteurs à explosion : fluide mélange air / essence

Machine à vapeur : fluide eau

Centrale thermique (ou nucléaire) : fluide eau sous pression.

ex récepteur :

pompe à chaleur fluide frigéon remplacé par
 réfrigérateur HFC hydrogénéofluorocarbure
 climatiseur (= fluide frigorigène ou réfrigérant)

On décompose l'étude de la machine thermique en différentes parties :

Système mécanique parfait : Système fermé n'échangeant que du travail de façon réversible.

= Subit une transformation adiabatique réversible.

Source de chaleur parfaite (ou Thermostat idéal) : Système fermé n'échangeant que de la chaleur de façon réversible, sans que sa température varie = Subit une transformation isotherme réversible.

ex de système méca : piston, turbine.
 note A

Second principe $\Delta S = S_{\text{éch}} + S_{\text{créé}}$

réversible $S_{\text{créé}} = 0$

adiab : $\delta Q = 0 \Rightarrow S_{\text{éch}} = \int \frac{\delta Q}{T_{\text{ext}}} = 0$

$\Rightarrow \Delta S_A = 0$ pour le système isentropique

ex de source idéale :

- source chaude : chaudière de laquelle on brûle 1 combustible (ou réactif nucléaire)
- source froide : océan ou fleuve

transf rév $\Rightarrow S_{\text{créé}} = 0$

$$\Rightarrow S_{\text{éch}} = \int \frac{\delta Q}{T_{\text{ext}}} = \int \frac{\delta Q}{T}$$

(si rév (eq thermique $\forall T$))

$$S_{\text{éch}} = \frac{1}{T} \int \delta Q = \frac{Q}{T} \text{ pour 1 isotherme}$$

$$\Delta S_{\text{source}} = \frac{Q_{\text{source}}}{T_{\text{source}}} \text{ pour 1 source idéale}$$

2.) Machine monotherme

Def. Le fluide qui décrit le cycle n'échange de la chaleur qu'avec une source de chaleur à la température T_s .

Énoncé de Kelvin du second principe : Il n'existe pas de moteur cyclique monotherme : on ne peut pas fournir du travail à partir d'une seule source de chaleur.

Machine monotherme : (1) $\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q = 0$ (2) $\Delta S_{\text{fluide}} = S_{\text{ech}} + S_{\text{créée}} = \frac{Q}{T_s} + S_{\text{créée}} = 0$

Système {n moles de fluide} fermé qui décrit des cycles.
Pour un nombre entier de cycles :
(ou pour 1 cycle)

1^{er} principe :

$\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q$
où W, Q algébriques > 0 si reçus par le fluide, < 0 sinon

$\Delta U_{\text{fluide}} = 0$ car U fonction d'état
($E_I = E_F$ pour 1 cycle et ΔU ne dépend pas du chemin suivi)

$\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q = 0$ (1)

2nd principe : $\Delta S_{\text{fluide}} = S_{\text{ech}} + S_{\text{créée}}$

$\Delta S_{\text{fluide}} = 0$ car S fonction d'état

$S_{\text{ech}} = \int \frac{\delta Q}{T_{\text{ext}}} = \int \frac{\delta Q}{T_s}$ (n'échange de la chaleur qu'avec la source)

Pour 1 source parfaite : $S_{\text{ech}} = \frac{1}{T_s} \int \delta Q$

(1) car $T_s = \text{cte} \Rightarrow S_{\text{ech}} = \frac{Q}{T_s}$

2nd principe : $\Delta S_{\text{fluide}} = \frac{Q}{T_s} + S_{\text{créée}} = 0$ (2)

Or $S_{\text{créée}} \geq 0 \Rightarrow S_{\text{créée}} = -\frac{Q}{T_s} \geq 0$

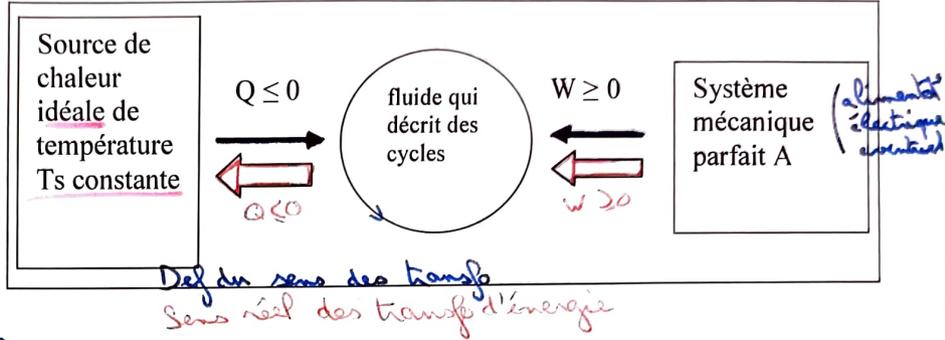
$\Rightarrow Q \leq 0 \Rightarrow W = -Q \Rightarrow W \geq 0$

Récepteur : Reçoit du travail pour fournir de la chaleur à l'ext ($Q < 0$)
moyen de chauffage.

ex: radiateur électrique à fluide caloporteur
(= radiateur à bain d'huile)

On ne peut pas avoir $W < 0$ avec 1 seule source de chaleur.

\Rightarrow On ne peut pas créer de moteur



3.) Généralités sur les machines dithermes

Le fluide échange de la chaleur avec deux sources de température T_f et T_c .

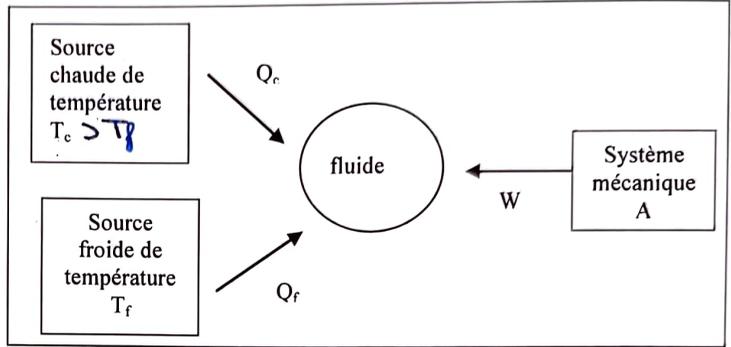
Machine ditherme : (1) $\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q_c + Q_f = 0$

(2) $\Delta S_{\text{fluide}} = S_{\text{ech}} + S_{\text{créée}} = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_{\text{créée}} = 0$

Inégalité de Carnot Clausius : $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$

$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$ si le cycle est réversible

Système {n moles de fluide} fermé, qui décrit des cycles.



Pour un nombre entier de cycles :

1^{er} principe : $\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q = 0$

$Q = Q_{\text{cycle}} = Q_c + Q_f$

car U fonction d'état

$\Rightarrow \Delta U_{\text{fluide}} = W + Q_c + Q_f = 0$ (1)

2nd principe $\Delta S_{\text{fluide}} = S_{\text{ech}} + S_{\text{créée}} = 0$

car S fonction d'état

et $S_{\text{ech}} = \int_{\text{cycle}} \frac{\delta Q}{T} = \int_{\text{cycle}} \frac{\delta Q}{T_c} + \int_{\text{cycle}} \frac{\delta Q}{T_f}$

Sources parfaites : $S_{\text{ech}} = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f}$

$\Rightarrow \Delta S_{\text{fluide}} = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_{\text{créée}} = 0$ (2)

$S_{\text{créée}} \geq 0 \Rightarrow S_{\text{créée}} = -\frac{Q_c}{T_c} - \frac{Q_f}{T_f} \geq 0$

$\Rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$ Inégalité de Carnot Clausius (à connaître et savoir redémontrer)

Si T_c et T_f constants

Si le cycle est décrit de façon réversible

$S_{\text{créée}} = 0 \Rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$ Égalité de Carnot Clausius

Pour plusieurs sources : (1) $\Delta U_{\text{fluide}} = W + \sum_i Q_i = 0$

(2) $\Delta S_{\text{fluide}} = S_{\text{créée}} + \sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$

II Moteurs thermiques

1.) Fonctionnement

Moteur thermique ditherme: Transforme une partie de la chaleur qu'il reçoit en travail mécanique.

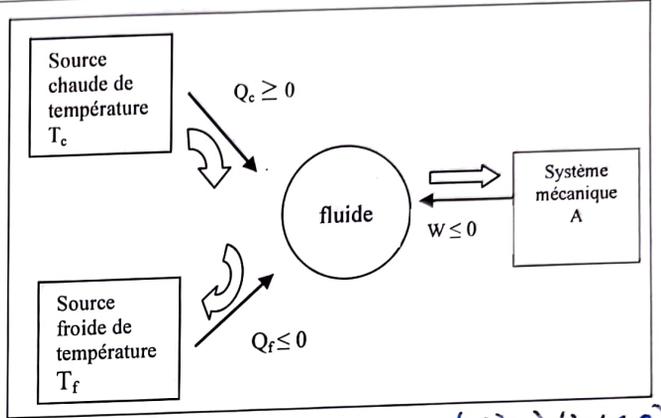
Pour fournir un travail, le fluide reçoit de la chaleur de la source chaude et cède de la chaleur à la source froide. $W < 0 \Rightarrow Q_f < 0$ et $Q_c > 0$.

Le fluide doit fournir 1 travail au système mécanique: $W < 0$

① $\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q_c + Q_f = 0$

② $\Delta S_{\text{fluide}} = \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} + W = 0$

$\Rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} < 0$ (2')



Exemple du moteur thermique:

- Pour que le fluide fournisse du travail au système méca (piston) ($W < 0$) - il doit recevoir de la chaleur de la source chaude (combustion du mélange air-carburant) ($Q_c > 0$)
- la chaleur résiduelle est évacuée vers l'ext (air ext) ($Q_f < 0$)

démo: On démontre d'abord le transfert de même signe

$W < 0 \Rightarrow$ on cherche le signe de Q_f

① $Q_c = -Q_f - W$ ②' $\Rightarrow \frac{-Q_f}{T_c} - \frac{W}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} < 0 \Rightarrow Q_f \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_c} \right) < \frac{W}{T_c}$

$\Rightarrow Q_f \frac{T_c - T_f}{T_f T_c} < \frac{W}{T_c} < 0$ car $W < 0$ et $T_f > 0$ (Température en Kelvin)

$T_c > T_f$

Donc $Q_f < 0$ voir les redémontres.

① $Q_c = \frac{-Q_f}{< 0} - \frac{W}{< 0}$ $Q_c > 0$

Moteur: Le fluide fournit 1 travail à 1 syst méca (piston ou turbine) Reçoit de la chaleur de la source chaude (combustion d'1 combustible dans 1 chambre) et évacue de la chaleur résiduelle vers la source froide. (air ext ou océan ou fleuve) à travers 1 échangeur (ailettes de refroidissement par ex.)

2.) Rendement

$$r = \frac{\text{grandeur valorisabè ou utile}}{\text{grandeur coûteuse}} \leq 1 \quad r = -\frac{W_{\text{cycle}}}{Q_c}$$

Théorème de Carnot : Le rendement de Carnot est le rendement d'un moteur ditherme cyclique réversible. Il est indépendant du système thermodynamique qui évolue. Il ne dépend que de la température des sources.

$$r_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Le rendement d'un moteur ditherme réel est inférieur au rendement de Carnot : $r \leq r_c$

$$Rq: r = \left| \frac{W_{\text{cycle}}}{Q_c} \right| \text{ ou } \left| \frac{W_{\text{cycle}}}{Q_c} \right| = W < 0$$

$$r = -\frac{W_{\text{cycle}}}{Q_c} \quad r = -\frac{W}{Q_c}$$

$$\textcircled{1} \Delta U_{\text{cycle}} = W + Q_c + Q_f = 0$$

$$\textcircled{2} \Delta S_{\text{cycle}} = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_{\text{créée}} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \quad \textcircled{2} \text{ Carnot classique.}$$

$$\textcircled{1} -W = Q_c + Q_f \Rightarrow r = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c}$$

$$r = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} \quad (\text{cf cycle de Carnot TD THz})$$

$$\textcircled{2} \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0 \Rightarrow \frac{Q_f}{T_f} \leq -\frac{Q_c}{T_c}$$

$$Q_c > 0 \Rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} \leq -\frac{T_f}{T_c}$$

$$1 + \frac{Q_f}{Q_c} \leq 1 - \frac{T_f}{T_c} \Rightarrow r \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Si le cycle est décrit de façon réversible :

$$S_{\text{créée}} = 0 \Rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$$

$$\Rightarrow r_c = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad \text{rendement de Carnot}$$

