Machines thermiques

I) Principe

1) Caractéristiques d'une machine thermique

Une machine thermique permet une conversion d'énergie thermique en travail mécanique ou inversement.

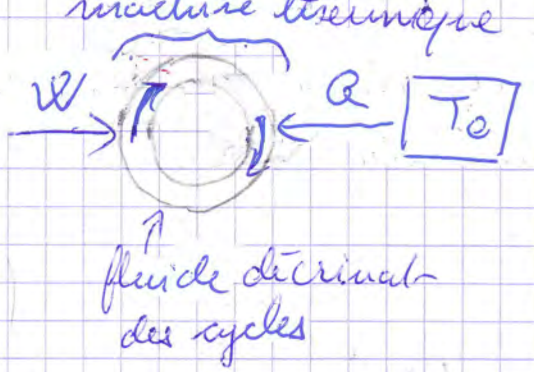
Exemple : moteur, réfrigérateur ...

Pour permettre un fonctionnement continu, la machine effectue des cycles. La machine thermique est un moteur si elle fournit du travail, c'est à dire si le travail reçu par le fluide est négatif : $W<0$.

Si elle reçoit du travail c'est un récepteur : $W>0$ (réfrigérateur, pompe à chaleur)

2) Machines monothermes

Une machine est monotherme si elle échange de la chaleur avec une seule source.



en thermo : W et Q sont tjrs algébriquement reçus par le fluide (le Σ)

Remarque :

$\forall X$ grandeur d'état, sur un cycle on a $\Delta_{cycle} X = X_f - X_i = X_i - X_i = 0$

Appliquons le 1er principe au syst. {fluide} sur un cycle :

$$\begin{cases} \Delta_{cycle} U = W + Q \\ \Delta_{cycle} U = 0 \end{cases} \Rightarrow W + Q = 0$$

Le deuxième principe s'écrit

$$\begin{cases} \Delta_{cycle} S = \frac{Q}{T_0} + \underbrace{S_c}_{\geq 0} \\ \Delta_{cycle} S = 0 \end{cases} \Rightarrow \frac{Q}{T_0} \leq 0$$

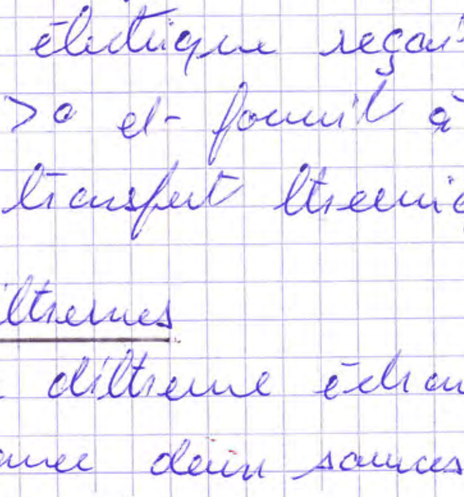
On en déduit que $Q \leq 0$ (car $T > 0$) et donc $W \geq 0$. Le Σ ne peut que recevoir du W. Il ne peut un cycle

On en déduit ~~donc~~ que les moteurs monothermes n'existent pas.

Une machine réceptrice est par contre possible : le radiateur électrique reçoit du travail électrique $W > 0$ et fournit à la source (la pièce) un transfert thermique $-Q = +W > 0$.

3) Machines dithermes

Une machine ditherme échange du transfert thermique avec deux sources (de températures différentes) : une "chaude" et une "froide".



Par convention W, Q_c et Q_f tjrs vers le Σ.

Le premier principe appliqué au fluide de la machine s'écrit :

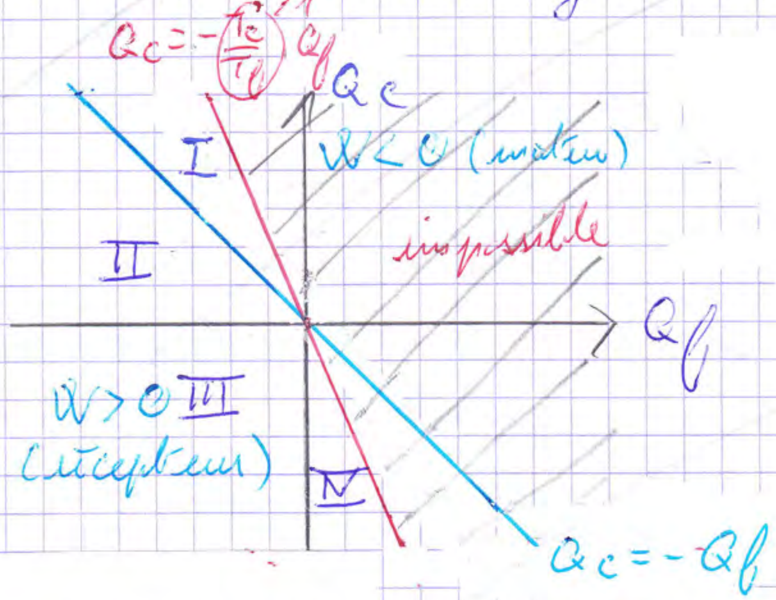
$$\begin{cases} \Delta_{cycle} U = W + \underbrace{Q_c + Q_f}_{Q} \\ \Delta_{cycle} U = 0 \end{cases} \Rightarrow W + Q_c + Q_f = 0$$

Le deuxième principe s'écrit

$$\begin{cases} \Delta_{cycle} S = \underbrace{\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f}}_{S_e} + \underbrace{S_c}_{\geq 0} \\ \Delta_{cycle} S = 0 \end{cases} \Rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$$

L'égalité est obtenue lorsque le cycle est décrit de manière réversible.

On peut alors tracer le diagramme de Raveau :



* Le cycle est réaliste $\Leftrightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$

$$\Leftrightarrow Q_c \leq -\frac{T_c}{T_f} Q_f$$

Sinon le cycle est impossible. ceci > 1

* Le cycle est moteur $\Leftrightarrow W < 0 \Leftrightarrow Q_c + Q_f > 0$

$$\Leftrightarrow Q_c > -Q_f$$

Sinon le cycle est récepteur.

(4)

* zone I : $W < 0$, $Q_c > 0$ et $Q_f < 0$
La machine fournit du travail. C'est un moteur.
Elle reçoit du transf. therm de la source chaude et en fournit à la source froide.

* zone II : $W > 0$, $Q_c > 0$ et $Q_f < 0$
La machine reçoit du travail pour que la source chaude fournisse du transfert thermique et que la source froide en reçoive. C'est une zone inintéressante : le transfert thermique peut se faire de façon spontanée.

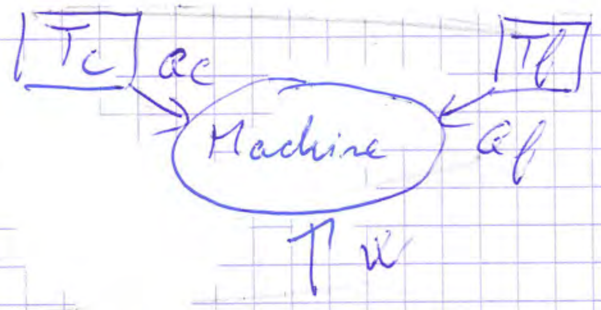
* zone III : $W > 0$, $Q_c < 0$ et $Q_f < 0$
La machine reçoit du travail pour fournir du transfert thermique à la source froide et à la source chaude. C'est une zone inintéressante : une machine monotherme suffit pour fournir du transfert thermique à une source.

* zone IV : $W > 0$, $Q_c < 0$ et $Q_f > 0$. (opposé du moteur)
La machine reçoit du travail pour fournir du transfert thermique à la source chaude et en prendre à la source froide.
C'est un transfert therm. contraire à l'échange spontané (intéressant).
C'est le cas des machines frigorifiques et des pompes à chaleur.

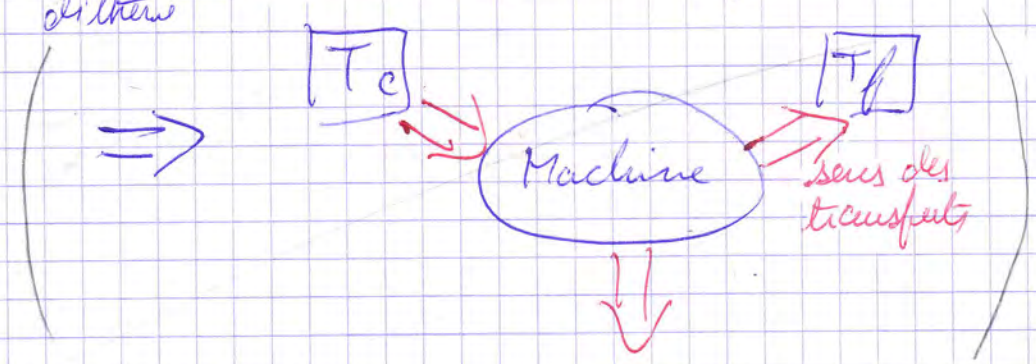
II Étude des machines dithermes

1) Le moteur ditherme

a) Principe



Pour 1 moteur ditherme : $W < 0$, $Q_c > 0$ et $Q_f < 0$ (zone I) :



Le système reçoit du transfert thermique de la source chaude : $Q_c > 0$ (combustion d'un carburant) et en cède à la source froide : $Q_f < 0$ (en général, l'atmosphère). Il fournit un travail : $W < 0$

C'est donc un moteur. On définit le rendement par le rapport entre la grandeur valorisable et la grandeur coûteuse.

g valorisable W
g coûteuse $Q_c > 0$

$\Rightarrow r = \left|\frac{W}{Q_c}\right|$ tous les W ; tous les $Q > 0$

$$r = \left|\frac{W}{Q_c}\right| = \frac{|W|}{|Q_c|} \underset{\substack{W<0 \\ Q_c>0}}{=} \frac{-W}{Q_c}$$

* $W + Q_c + Q_f = 0 \Rightarrow r = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$

* $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \Rightarrow \frac{Q_f}{T_f} \leq -\frac{Q_c}{T_c} \times \underbrace{\frac{T_f}{Q_c}}_{>0} \Rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} \leq -\frac{T_f}{T_c}$

$T_f > 0$, $Q_c > 0$

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

$\Rightarrow \quad r \leq 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (< 1)$

b) Théorème de Carnot

On a $r \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$

Le rendement maximal correspond au cas idéal d'une machine réversible qu'on appelle parfois machine de Carnot et qui possède un rendement (de Carnot) $r_{car} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$.

Le th. de Carnot dit que le rendement d'un moteur réel est inférieur au rendement r_{car} d'un moteur ditherme réversible. Le rendement maximal r_{car} est indépendant de la technologie utilisée et ne dépend que des températures des sources.

Remarque : il faut que $T_f \ll T_c$ pour que $r_{car} \to 1$.

Exemple : avec $T_c = 1500K$ et $T_f = 300K$ $r_{car} = 80\%$.

[$A \xrightarrow[\text{révers.}]{\text{isoT } T_c} B \xrightarrow[\text{révers.}]{\text{adiab.}} C \xrightarrow[\text{révers.}]{\text{isoT } T_f} D \xrightarrow[\text{révers.}]{\text{adiab.}} A$]

(c) Cycle de Carnot

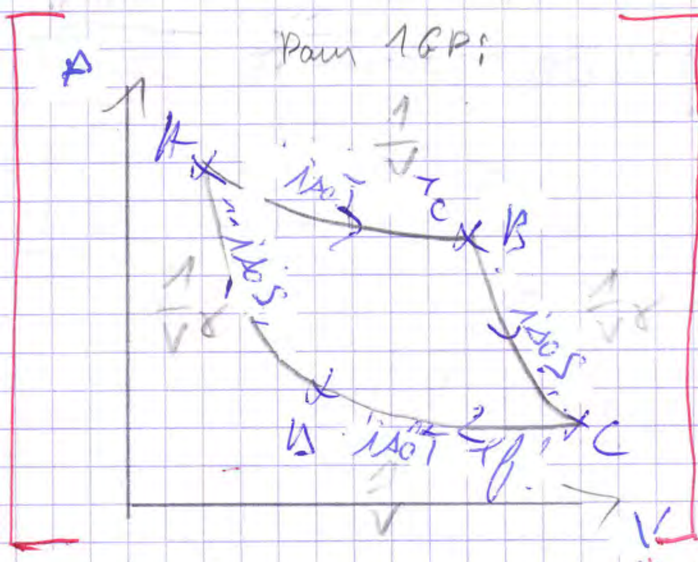
Le cycle de Carnot représente les transformations effectuées par une machine de Carnot :

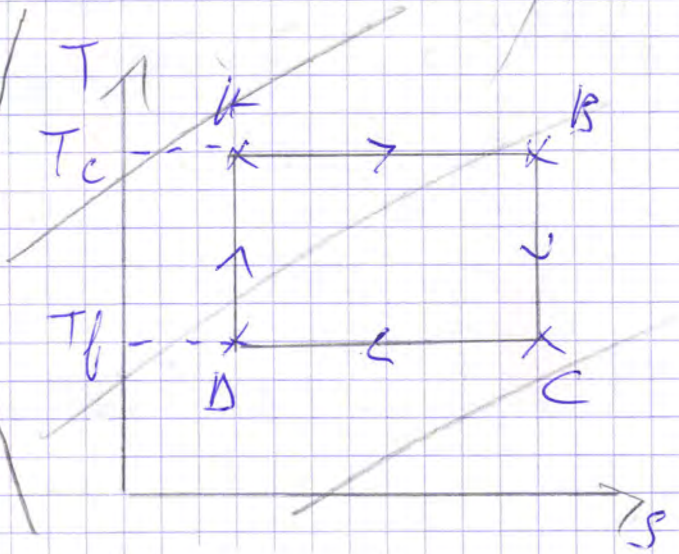
* AB : T° isoT et réversible à la T° T_c.
* CD : " " " " T_f.

T_f " " "

* BC et DA : transformations adiabatiques et réversibles

Pour 1GP :





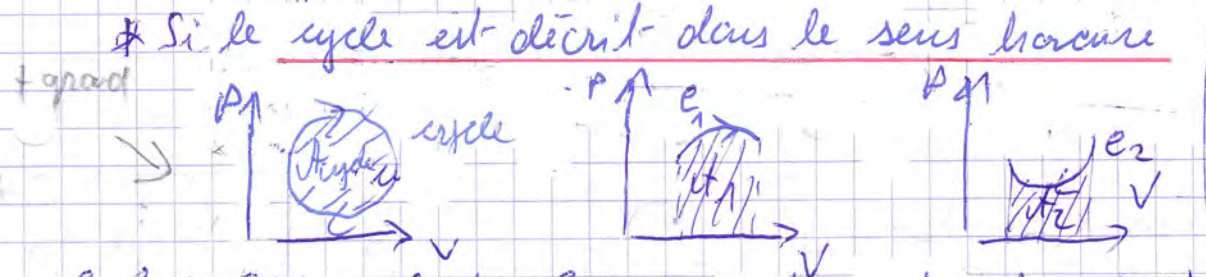
Le cycle étant réversible il est QS.

$$W \overset{\text{déf.}}{=} -\oint_{\text{cycle}} P_{ext}\, dV \overset{\text{défini QS}}{=} -\oint_{\text{cycle}} P\, dV = -A_{cycle}$$

C'est l'opposé de l'aire du cycle dans le diagramme de Watt (P,V).

* Si le cycle est décrit dans le sens horaire

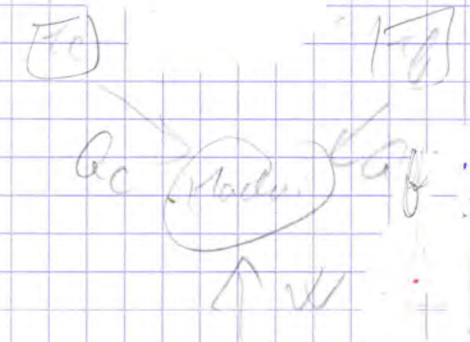
$\Rightarrow A_{cycle} > 0$
$\Rightarrow W = -A_{cycle} < 0$
$\Rightarrow$ le fluide fournit du W à l'ext.
$\Rightarrow$ cycle moteur



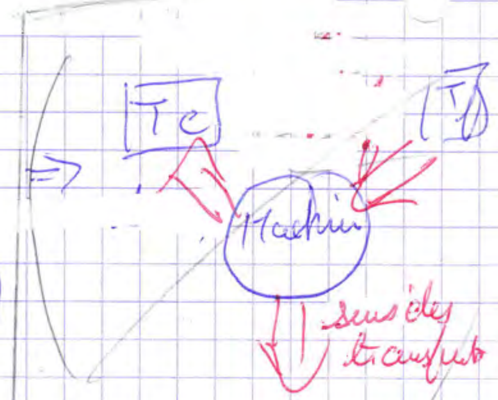
cycle $= e_1 \cup e_2 \Rightarrow \oint_{\text{cycle}} P\,dV = \int_{e_1} P\,dV + \int_{e_2} P\,dV \Rightarrow A_{cycle} = \underset{>0}{A_1} + \underset{<0}{A_2}$. Ici $|A_1| > |A_2|$

* si le cycle est décrit ds le sens anti-horaire c'est 1 cycle récepteur

② le réfrigérateur ditherme



Pour un frigo :
$W>0$; $Q_c<0$ et $Q_f>0$
(opposé du moteur ditherme)



le réfrigérateur prend de la chaleur à la source froide (l'intérieur du frigo) en cède à la source chaude (l'atmosphère de la pièce)

Pour fonctionner le réfrigérateur reçoit du travail. C'est un récepteur.

On définit l'eff par $e = \left|\dfrac{Q_f}{W}\right|$ — grandeur valorisable : $Q_f>0$; grandeur coûteuse : W ⇒

$$\Rightarrow e = \frac{|Q_f|}{|W|} \underset{\substack{W>0\\Q_f>0}}{=} \frac{Q_f}{W}$$

L'eff. max est obtenue ds le cas d'un cycle réversible.

* $W+Q_c+Q_f=0 \Rightarrow e_{car} = -\dfrac{Q_f}{Q_f+Q_c} = -\dfrac{1}{1+\dfrac{Q_c}{Q_f}}$

* $\dfrac{Q_c}{T_c}+\dfrac{Q_f}{T_f}=0 \Rightarrow \dfrac{Q_c}{Q_f} = -\dfrac{T_c}{T_f}$

$$\Rightarrow e_{car} = -\frac{1}{1-\dfrac{T_c}{T_f}} = \frac{1}{\dfrac{T_c}{T_f}-1} = \frac{T_f}{T_c-T_f}$$

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

$$\Rightarrow \quad e \leq \frac{1}{\frac{T_c}{T_f}-1}$$

ou

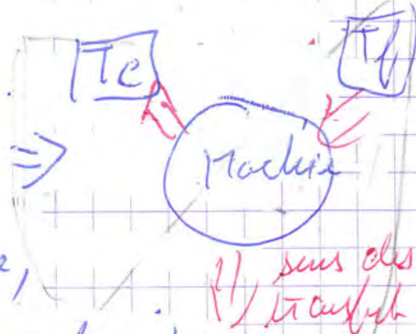
$$e \leq \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

L'égalité est obtenue pour un cycle réversible de Carnot : $e_c = \frac{1}{\frac{T_c}{T_f}-1} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$

Par exemple, pour un "froid" de 5°C et pour une atmosphère à 20°C, $e_{car} = 18,5$.
L'efficacité réelle est toujours inférieure à l'efficacité de Carnot.
Le cycle est le même que pour un moteur de Carnot mais il est décrit dans l'autre sens ($W > 0$).
Remarque : il faut que $T_c \to T_f$ pour que $e_{car} \to +\infty$

3) Pompe à chaleur ditherme

Par convent°



$W>0$, $Q_c<0$ et $Q_f>0$

(opposé du moteur ditherme, identique au frigo)

Une pompe à chaleur cède des transferts therm à la source chaude (la pièce) et en prend à la source froide (généralement l'atmosphère)

Le fonctionnement est le même que pour un réfrigérateur mais l'objectif n'est pas de refroidir la source froide mais de réchauffer la source chaude

Pour fonctionner la PAC reçoit du travail c'est un récepteur. L'efficacité est définie par

grandeur valorisable : $Q_c<0$

grandeur coûteuse : W

$$\Rightarrow e = \left|\frac{Q_c}{W}\right| > 1$$

$$\Rightarrow e = \frac{|Q_c|}{|W|} \underset{\substack{Q_c<0\\W>0}}{=} \frac{-Q_c}{W}$$

L'eff. max est obtenue ds le cas d'un cycle réversible.

$$* \; W+Q_c+Q_f=0 \Rightarrow e_{car} = \frac{Q_c}{Q_c+Q_f} = \frac{1}{1+\frac{Q_f}{Q_c}}$$

revers.

$$* \; \frac{Q_c}{T_c}+\frac{Q_f}{T_f} = 0 \Rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} = -\frac{T_f}{T_c}$$

$$\Rightarrow e_{car} = \frac{1}{1-\frac{T_f}{T_c}} = \frac{T_c}{T_c-T_f}$$

$$\Rightarrow \quad e \leq \frac{1}{1-\frac{T_f}{T_c}}$$

$$\text{ou} \quad e \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

Lorsque chaque τ se fait de 1 machine, il faut utiliser le 1er ppe industriel (1er ppe pour 1 Σ ouvert)

L'égalité est obtenue pour un cycle réversible de Carnot : $e_c = \frac{1}{1-\frac{T_f}{T_c}} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$

Par exemple pour un "froid" de 5°C et pour une T_c de 17°C, $e_{car} = 24$.

Remarque 1 : Il faut que $T_f \to T_c$ pour que $e_{car} \to +\infty$.

Remarque 2 : la pompe à chaleur est e fois plus efficace que le radiateur électrique (machine monotherme) qui ~~consomme un travail W et fournit un transfert thermique $-Q = W$~~ a 1 rendement de 1. Mais la mise en œuvre des machines dithermes est plus délicate.

Remarque 3 : les cycles réels sont bien différents du cycle de Carnot. L'étude de ce dernier permet juste de majorer le rendement ou l'efficacité. en l'absence de parties mobiles $W' = 0$

Rappel $\Delta h + \Delta e_c = W' + q$

III) Exemples de machines ouvertes idéales

* compresseur : $W' > 0$, $Q = 0$	chbre combust° : $W' = 0$, $Q > 0$
* turbine : $W' < 0$, $Q = 0$	pas de parties mob. échangeur : $W' = 0$, $Q \gtrless 0$
* tuyère : $W' = 0$, $Q = 0$, $\Delta E_c > 0$	échangeur évaporateur (ch. état) : $W' = 0$, $Q > 0$
* détendeur : $W' = 0$, $Q = 0$ pas de parties mobiles	échangeur condenseur (ch. état) : $W' = 0$, $Q < 0$

en rouge

V Exemples :

① Bear Rodney

② Chien de d'Alembert.

avec ① $\xrightarrow[\text{rév.}]{\text{adiab}}$ ② $\xrightarrow[\text{rév.}]{\text{isoT}}$ ③ $\longrightarrow$