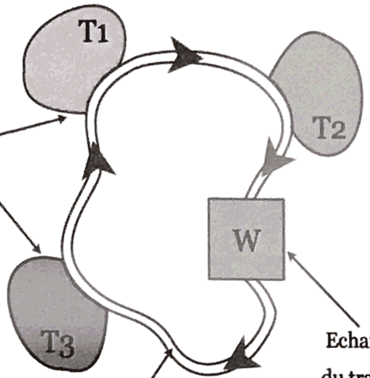
THERMO 5 MACHINES THERMIQUES

Objectif :

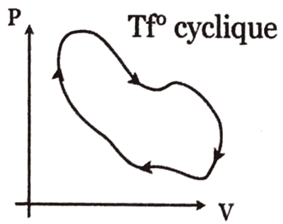
Mettre à profit les échanges de chaleur pour réaliser des conversions d'énergies entre des sources idéales de température et des sources de travail.

I PRINCIPE GÉNÉRAL



Principe général :

On utilise un système fluide qui va décrire un cycle, au cours duquel il échange du travail et de la chaleur :



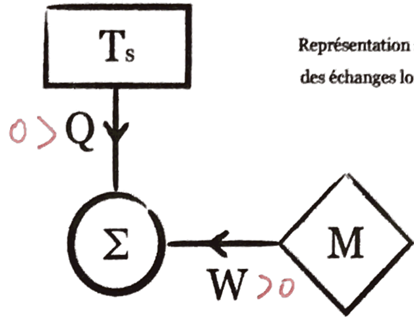
Ex : fréon -> réfrigérateur | récepteur : W>0

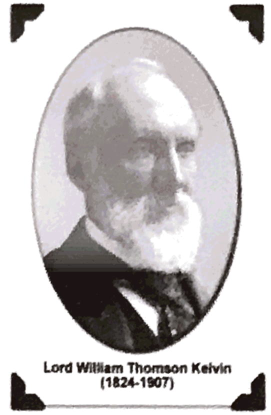
Eau -> machine à vapeur
mélange air-essence -> moteur à explosion | Moteur : W<0

Dans la plupart des cas on met à profit des changements d'états

Cf Thermo 6

1 - Le cycle monotherme





Lord William Thomson Kelvin (1824-1907)

* 1er principe : $\Delta U = Q + W = 0$
* 2nd principe : $\Delta S = S^e + S^c = 0$

} cycle

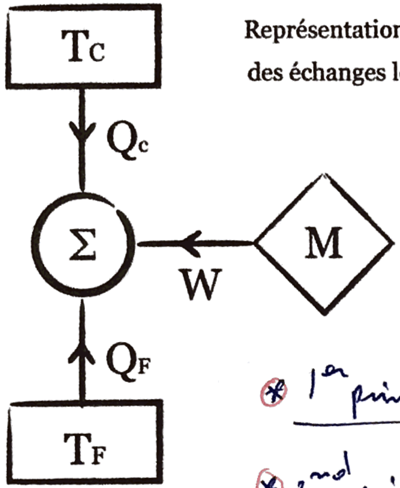
$$S^e = \int \frac{\delta Q^e}{T_{surf\,ext}} = \oint \frac{\delta Q^e}{T_s} = \frac{1}{T_s}\int \delta Q^e = \frac{Q^e}{T_s}$$

$$S^c = -S^e = \frac{-Q^e}{T_s} \geq 0 \quad \text{Soit } \boxed{Q^e \leq 0} \Rightarrow \boxed{W \geq 0}$$

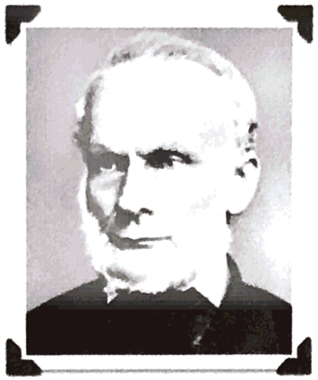
Principe de Thomson :

«Un système décrivant un cycle monotherme ne peut que recevoir du travail et produire de la chaleur.»

2 -Principe de Clausius



Représentation schématique des échanges lors d'un cycle



R.J.E Clausius (1822 - 1888)

* 1er principe : $\Delta U = W + Q_F + Q_C = 0$

* 2nd principe : $\Delta S = S^e + S^c = 0$

Or $S^e = S^e_{T_C} + S^e_{T_F} = \int \frac{\delta Q_F^e}{T_F} + \int \frac{\delta Q_C^e}{T_C} = \frac{1}{T_F}\underbrace{\int \delta Q_F^e}_{Q_F} + \frac{1}{T_C}\underbrace{\int \delta Q_C^e}_{Q_C}$

Soit $\boxed{S^e = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C}}$

Or $S^c = -S^e \geq 0 \Rightarrow S^e \leq 0$ $\quad \boxed{\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} \leq 0}$

inégalité de Clausius.

Cas particulier : W = 0 $\quad Q_F = -Q_C \quad Q_C\left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_F}\right) \leq 0$

$Q_C \frac{T_F - T_C}{T_F T_C} \leq 0 \quad Q_C \frac{T_C - T_F}{T_F T_C} \geq 0$

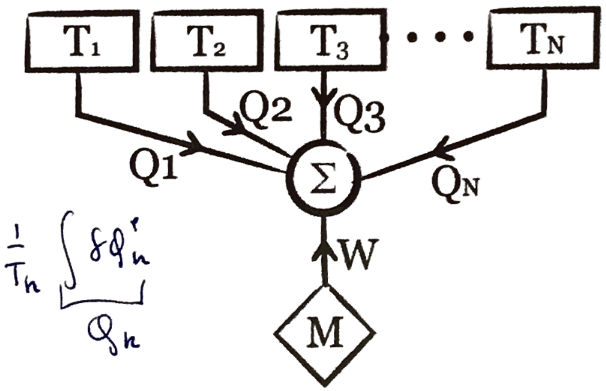
$T_C > T_F \Rightarrow Q_C \geq 0$

$Q_F \leq 0.$

Principe de Clausius :

«La chaleur ne passe pas spontanément d'un corps froid vers un corps chaud.»

Généralisation à N sources :



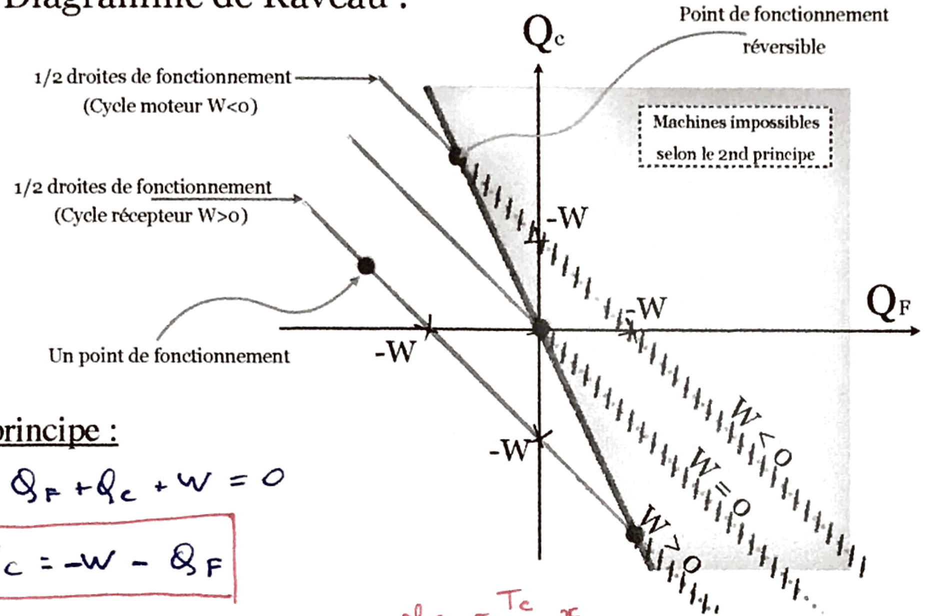
$S^e = \sum_k \int \frac{\delta Q_k^e}{T_k} = \sum_k \frac{1}{T_k} \underbrace{\int \delta Q_k^e}_{Q_k}$

$S^e = -S^c \leq 0$

$\hookrightarrow \boxed{\sum_k \frac{Q_k}{T_k} \leq 0}$

II MACHINES THERMIQUES DITHERMES

1 - Diagramme de Raveau :



1er principe :

$\Delta U = Q_F + Q_c + W = 0$

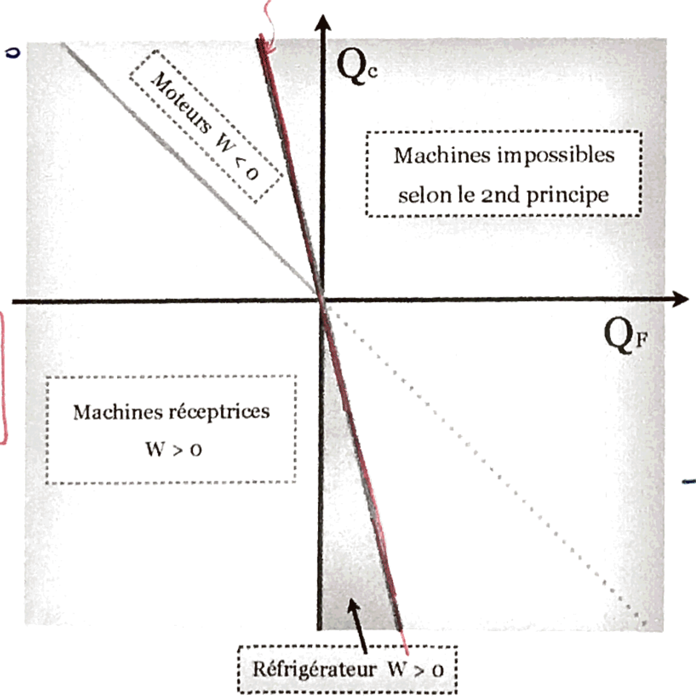
$\boxed{Q_c = -W - Q_F}$

2nd principe : $\Delta S = 0$

$S^e = -S^c \leq 0$

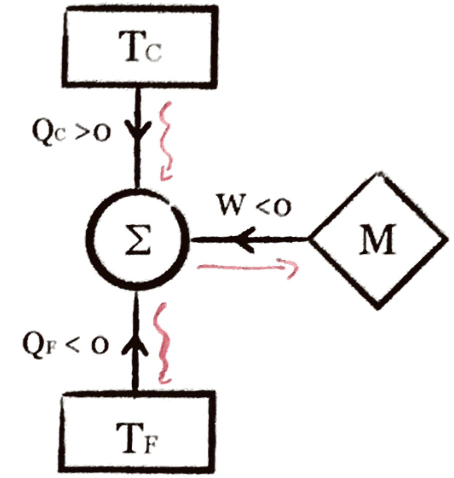
$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0.$

$\boxed{Q_c \leq -\frac{T_c}{T_F} \cdot Q_F}$



2 - Moteurs dithermes

On veut prélever du travail lors de l'écoulement de chaleur -> W < 0



Rendement d'un moteur :

$$\eta = \frac{\text{Ce que rapporte le moteur}}{\text{Ce que coûte le moteur}} = \frac{\text{travail produit}}{\text{chaleur reçue}} = \frac{-W}{Q_c}$$

(*) 1er Principe : $\Delta U = W + Q_F + Q_c = 0 \quad -W = Q_F + Q_c$

$$\eta = \frac{Q_F + Q_c}{Q_c} = 1 + \frac{Q_F}{Q_c}$$

IIème Principe : $Q_c > 0$

$$\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0 \qquad \frac{Q_F}{T_F} \leq -\frac{Q_c}{T_c} \quad \text{Soit} \quad \frac{Q_F}{Q_c} \leq -\frac{T_F}{T_c}$$

$$\eta = 1 + \frac{Q_F}{Q_c} \leq 1 - \frac{T_F}{T_c} = \eta_{Carnot}$$

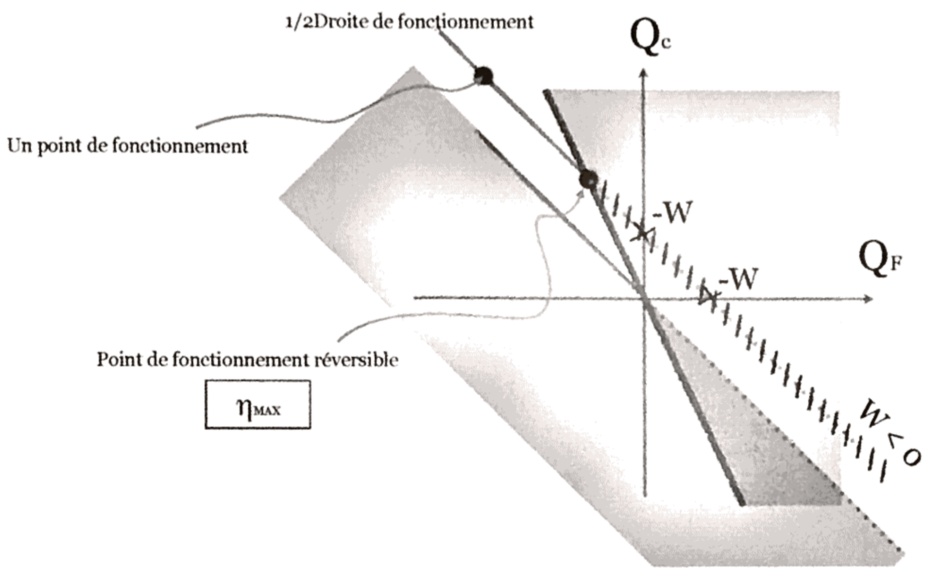
(*) 2nd principe

$$S^c + \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_c}{T_c} = 0 \qquad \frac{T_F S^c}{Q_c} + \frac{Q_F}{Q_c} + \frac{T_F}{T_c} = 0 \qquad \frac{Q_F}{Q_c} = -\frac{T_F}{T_c} - \frac{T_F S^c}{Q_c}$$

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{T_F}{T_c} - \frac{T_F}{Q_c} \cdot S^c}$$

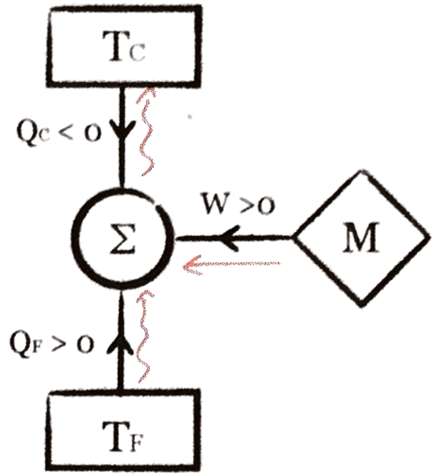
$$\eta \leq \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_F}{T_c} \quad \left\{ \text{égalité si réversible} \right.$$

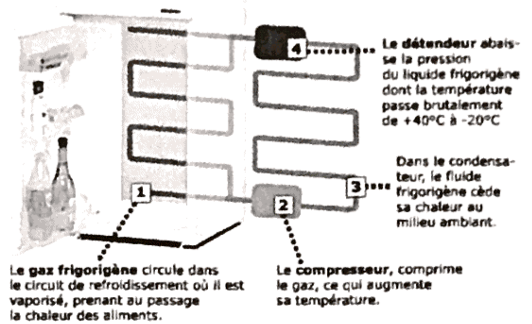
Diagramme de Raveau du moteur :



3 - Le réfrigérateur

On veut enlever de la chaleur au réfrigérateur -> $Q_F > 0$





Σ : fluide frigorigène

Théorème de Carnot

Le rendement maximum de tout moteur ditherme est obtenu pour un fonctionnement réversible et ne dépend que du rapport des températures par :

$$\boxed{\eta_{max} = 1 - \frac{T_F}{T_C}}$$

AN : $T_F = 300\,K$, $T_c = 500\,K$ $\quad \eta_{max} = 1 - \frac{300}{500} = 40\%$

PB : Rendement ou puissance ? $\longrightarrow \frac{W}{\tau}$ il faut aller vite.

↳ réversible ⇒ il faut aller lentement.
$S^c = 0$

Efficacité d'un réfrigérateur : On ne parle pas de rendement car e>1

$$e = \frac{\text{Ce que rapporte le réfrigérateur}}{\text{Ce que coûte le réfrigérateur}} = \frac{\text{chaleur prélevée}}{\text{travail fourni}} = \frac{Q_F}{W}$$

Ier Principe : $\Delta U = 0 = W + Q_F + Q_c \qquad W = -Q_F - Q_c$

$$e = \frac{-Q_F}{Q_F + Q_c} \qquad \boxed{\frac{1}{e} = -1 - \frac{Q_c}{Q_F}}$$

IIème Principe :

$$\Delta S = S^c + \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_c}{T_c} = 0 \qquad \frac{T_c S^c}{Q_F} + \frac{T_c}{T_F} = -\frac{Q_c}{Q_F}$$

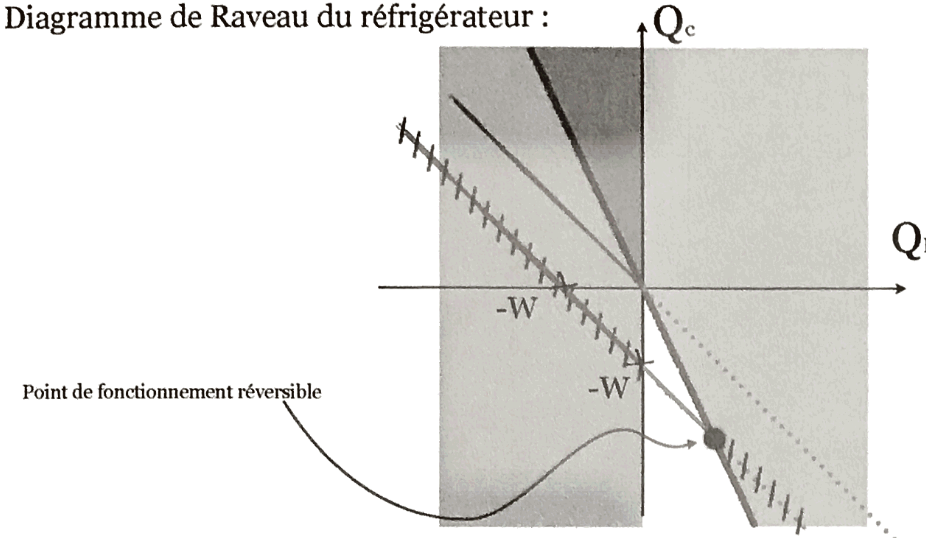
$$\frac{1}{e} = -1 + \frac{T_c}{T_F} + \frac{T_c}{Q_F} S^c \qquad S^c \nearrow \Rightarrow \frac{1}{e} \nearrow \Rightarrow e \searrow.$$

$$S^c = 0 \qquad \frac{1}{e_{max}} = \frac{T_c - T_F}{T_F} \qquad \boxed{e_{max} = \frac{T_F}{T_c - T_F}}$$

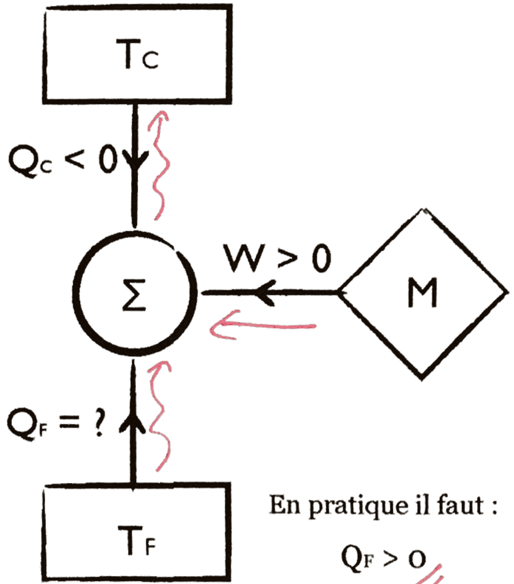
obtenue pour $S^c = 0$

$$e^{th}_{max} = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad AN \quad T_F = 5°C = 278K \quad T_C = 25°C = 298K \quad \boxed{e^{th}_{max} \simeq 14}$$

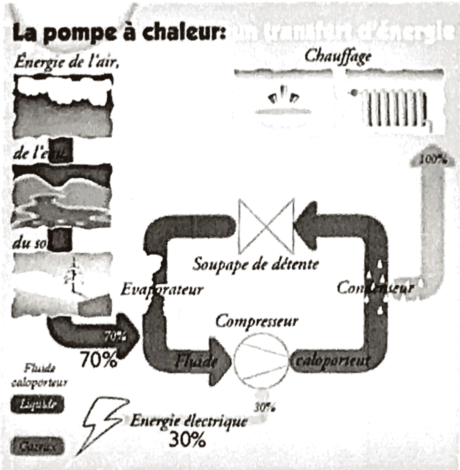
Diagramme de Raveau du réfrigérateur :



4 - Les pompes à chaleurs (PAC)



On veut pomper de la chaleur vers la source chaude -> $Q_C < 0$



En pratique il faut : $Q_F > 0$

Efficacité d'une pompe à chaleur :

$$e = \frac{\text{Ce que rapporte la PAC}}{\text{Ce que coûte la PAC}} = \frac{\text{chaleur donnée}}{\text{travail fourni}} = \frac{-Q_C}{W} = \frac{Q_C}{-W}$$

Ier Principe : $\Delta U = 0 = Q_F + Q_C + W \qquad -W = Q_F + Q_C$

$$\frac{1}{e} = \frac{Q_F + Q_C}{Q_C} \qquad \boxed{\frac{1}{e} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}}$$

IIème Principe :

$$\Delta S = S^c + \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \qquad \frac{Q_F}{Q_C} = -\frac{T_F S^c}{Q_C} - \frac{T_F}{T_C}$$

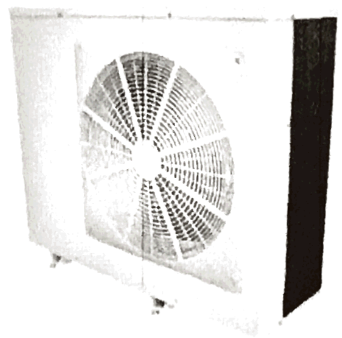
$$\frac{1}{e} = 1 - \frac{T_F}{T_C} - \frac{T_F S^c}{Q_C} \qquad Q_C \le 0 \Rightarrow S^c \nearrow \quad \frac{1}{e} \nearrow \quad e \searrow.$$

$$\frac{1}{e_{max}} = \frac{T_C - T_F}{T_C} \qquad \text{Rq : } e^{th}_{max} = \frac{1}{\eta_{Carnot}} > 1$$

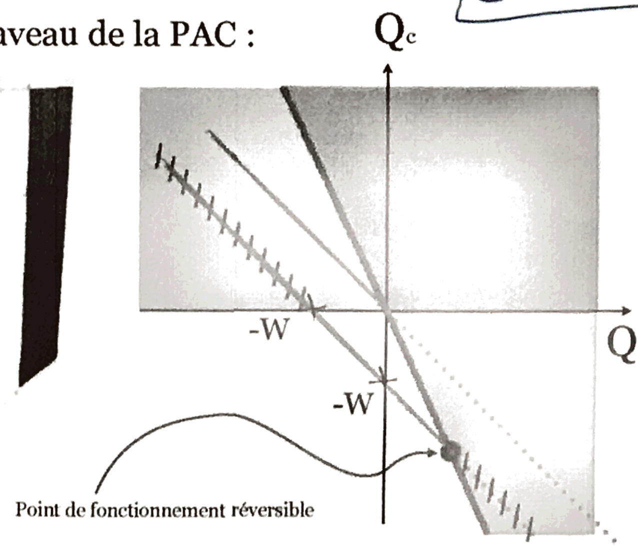
$$e^{th}_{max} = \frac{T_C}{T_C - T_F} \quad AN \quad T_C = 25°C = 298K \quad \text{hiver } T_F = 0°C = 273K \quad [\text{été } T_F' = 15°C = 288K]$$

$$\boxed{e^{th}_{max} = 11,9 \text{ hiver} \qquad [e^{th}_{max} = 29,8 \text{ été}]}$$

Diagramme de Raveau de la PAC :

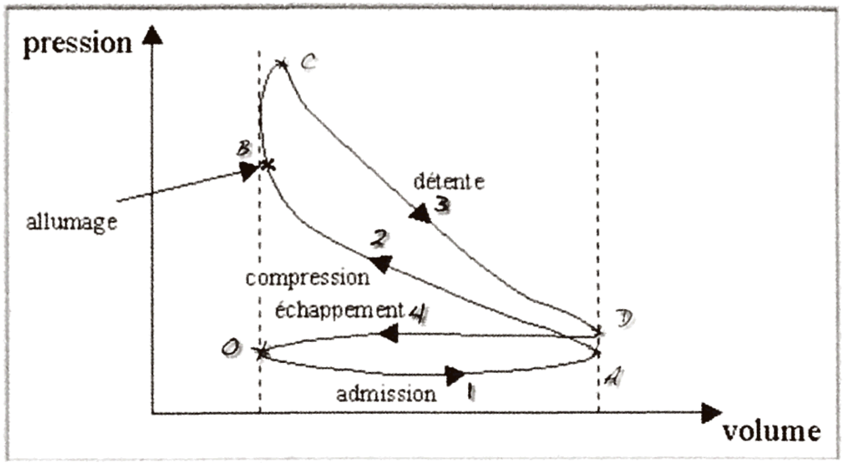


Une P.A.C



III Les cycles moteurs

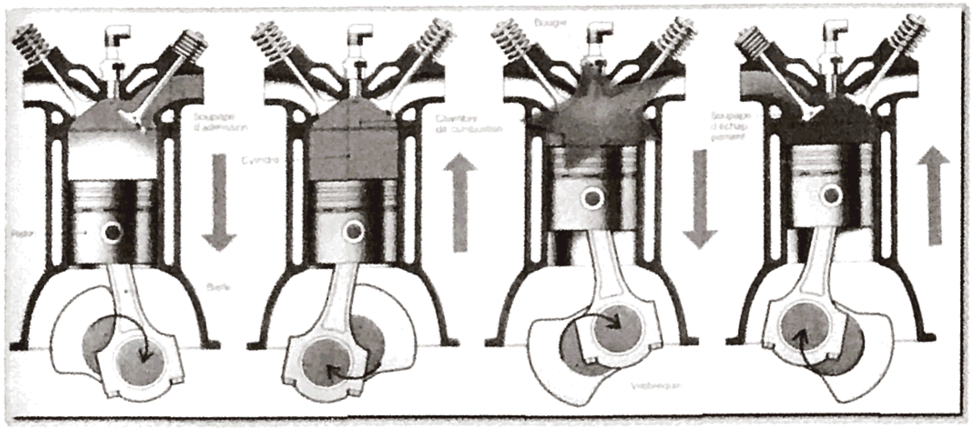
Principe général :



RQ : seuls OA et CD sont des temps moteurs, les autres temps étant récepteurs

Les quatre temps

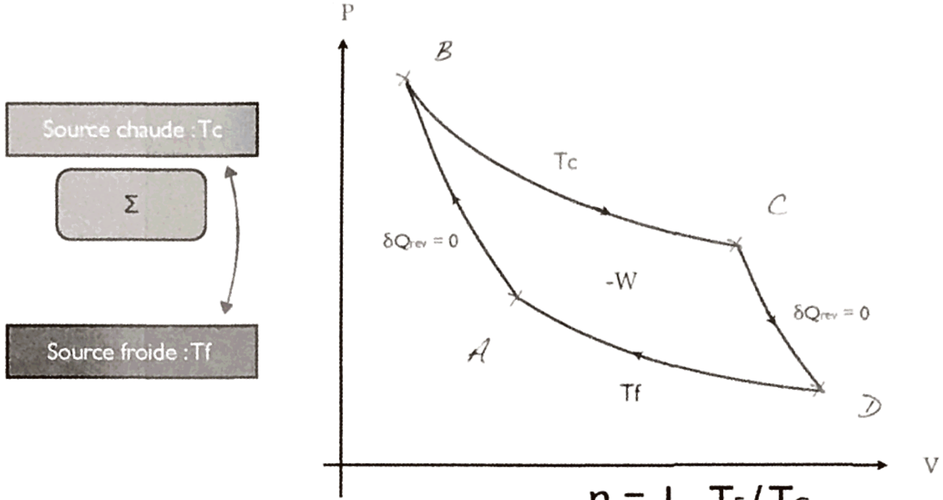
Admission | compression | Explosion détente | échappement



Vmin -> Vmax | Vmax -> Vmin | Vmin -> Vmax | Vmax -> Vmin

Construction du cycle moteur :

→ à partir du cycle de Carnot



$\eta = 1 - T_F / T_C$

Calcul exact du rendement : $\boxed{\eta = \frac{-W}{Q_c}}$

1er principe : $\Delta U = 0 = Q_F + Q_c + W = 0$ $\quad -W = Q_F + Q_c$

$\eta = \frac{Q_F + Q_c}{Q_c}$ $\quad \boxed{\eta = 1 + \frac{Q_F}{Q_c}}$ $\quad \boxed{\eta = 1 + \frac{Q_{DA}}{Q_{BC}}}$

* Isotherme $\Delta_{BC} U = Q_{BC} + W_{BC} = 0$.

$Q_{BC} = -W_{BC}$ Soit $Q_{BC} = +\int_B^C + P\,dV = \int_B^C nRT_c \frac{dV}{V}$

$Q_{BC} = nRT_c \left[\ln(V)\right]_{V_B}^{C}$ $\quad \boxed{Q_{BC} = nRT_c \ln\left(\frac{V_c}{V_B}\right) > 0}$

De la même façon DA isotherme $\quad \boxed{Q_{DA} = nRT_F \ln\left(\frac{V_A}{V_D}\right) < 0}$

Soit $\eta = 1 + \frac{\cancel{nR} T_F \ln\left(\frac{V_A}{V_D}\right)}{\cancel{nR} T_C \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)}$ $\qquad \eta = 1 - \frac{T_F}{T_C} \cdot \frac{\ln\left(\frac{V_D}{V_A}\right)}{\ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)}$

* Adiabatiques réversibles :

Laplace $T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$

$T_D V_D^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1}$ $\rightarrow$ $\frac{\cancel{T_A} V_A^{\gamma-1}}{\cancel{T_D} V_D^{\gamma-1}} = \frac{\cancel{T_B} V_B^{\gamma-1}}{\cancel{T_C} V_C^{\gamma-1}}$

$T_A = T_D$ $\qquad T_B = T_C$

$\cancel{(\gamma-1)} \ln\left(\frac{V_A}{V_D}\right) = \cancel{(\gamma-1)} \ln\left(\frac{V_B}{V_C}\right)$ Soit $\ln\left(\frac{V_D}{V_A}\right) = \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)$.

et $\boxed{\eta = 1 - \frac{T_F}{T_C}} = \eta_{carnot}$.

Le cycle de carnot réalise le rendement maximum !

Pourquoi : * S_P^{rev} : AB et CD sont réversibles

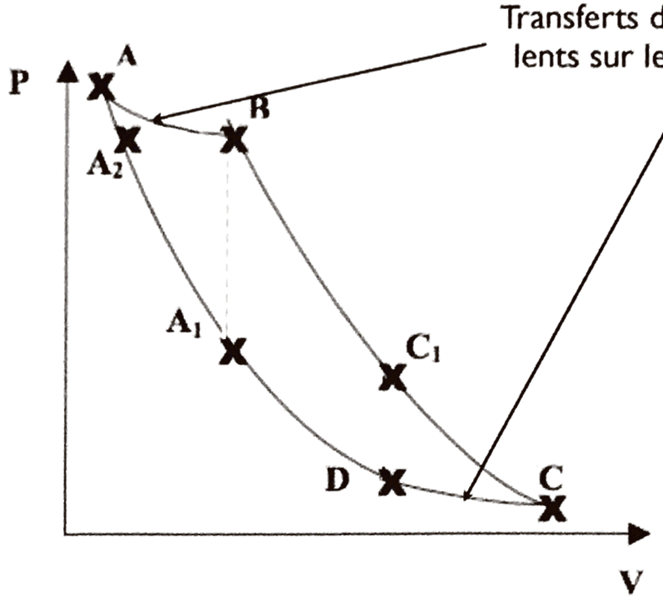
* isotherme : réversible on échange Q_{BC} à T_C, Q_{DA} à T_F

Σ est mis en contact avec source chaude lorsqu'il a la Température TC (idem froide)

CN pour qu'il n'y ait pas de créat° d'entropie.

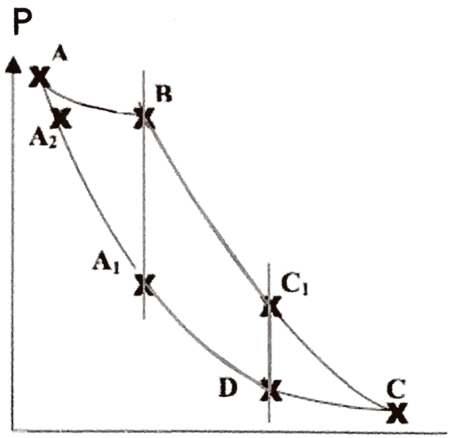
Pb il faut attendre ...

Le cycle de Carnot a le meilleur rendement possible mais ...

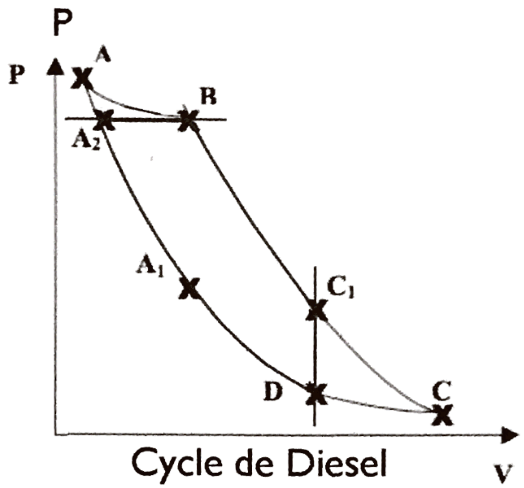


=> Impossible d'en extraire de la puissance

On peut envisager différents compromis d'optimisation du moteur :



Cycle de Beau de Rochas

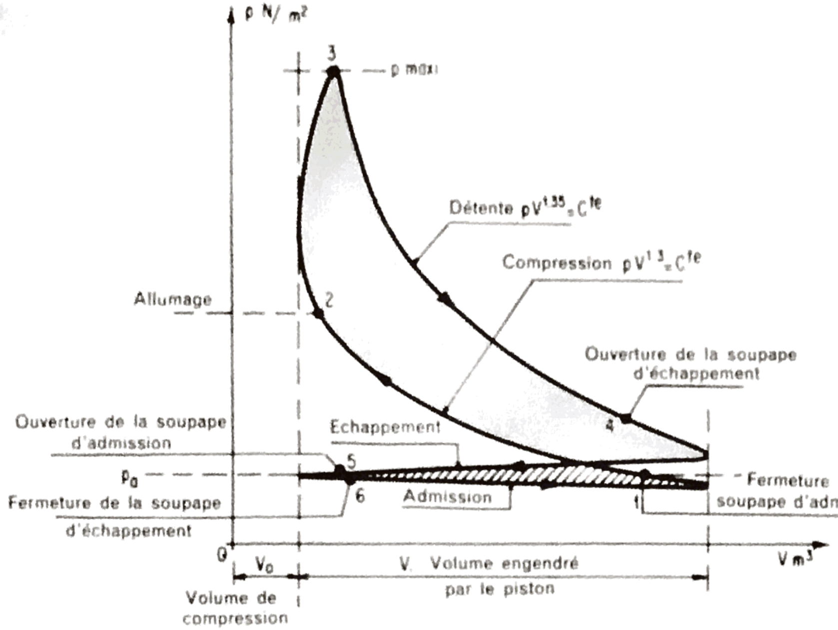


Cycle de Diesel

En passant par des étapes irréversibles => baisse de rendement

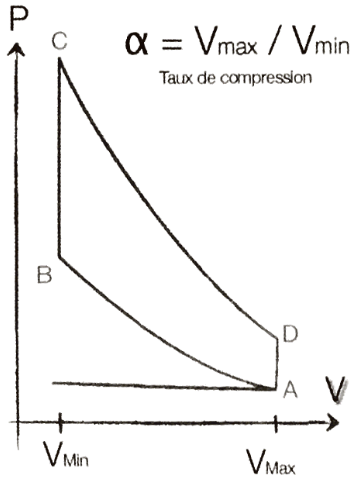
=> Plus de puissance

Le cycle du moteur à essence :



Modélisation du cycle essence :

Le cycle de Beau de Rochas



$\alpha = V_{max} / V_{min}$

Taux de compression

- 2 isochores
- 2 adiabatiques réversibles
- Pas de cycle résistant

$$\boxed{\eta = 1 - \alpha^{1-\gamma}}$$

$\eta^{th} < 65\%$

$\eta = \frac{-W}{Q_{BC}}$ * 1er principe $\Delta U = 0 = W + Q_{BC} + Q_{DA} = 0$ $(Q_{CD} = Q_{AB} = 0)$

$\eta = + \frac{Q_{BC} + Q_{DA}}{Q_{BC}}$ $\boxed{\eta = 1 + \frac{Q_{DA}}{Q_{BC}}}$

* Chaleur Q_{DA} Q_{BC} → isochore. $V = c^{te} \Rightarrow dV = 0 \Rightarrow \delta W = 0$

$\Delta U_{BC} = \underbrace{\cancel{W_{BC}}}_{0} + Q_{BC} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_C - T_B)$ de même

$$\begin{cases} Q_{BC} = \frac{nR}{\gamma-1}(T_C - T_B) \\ Q_{DA} = \frac{nR}{\gamma-1}(T_A - T_D) \end{cases}$$

Soit $\boxed{\eta = 1 + \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B}}$

* $\delta Q^{rev} = 0$ en (T, V) ⇒ $T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$ $\alpha = \frac{V_A}{V_B} = \frac{V_D}{V_C}$

$T_C V_C^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1}$

$T_B = T_A \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\gamma-1} =$

$T_C = T_D \left(\frac{V_D}{V_C}\right)^{\gamma-1} =$ ⇒ $\left| \begin{array}{l} T_B = T_A \alpha^{\gamma-1} \\ T_C = T_D \alpha^{\gamma-1} \end{array} \right.$

Soit $\eta = 1 + \frac{T_A - T_D}{(T_D - T_A)\alpha^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}$

$\boxed{\eta^{th} = 1 - \alpha^{1-\gamma}} \leq \eta_{Carnot}$ car ∃ des processus irréversibles $S^c > 0$

AN : Moteur essence : $\alpha \simeq 13$ $\gamma = 1,4$

$\eta^{th} = 1 - 13^{-0,4} = 0,64\% < \eta^{Carnot}$

$\left[\begin{array}{l} T_A = 300K \rightarrow T_B = 13^{\gamma-1}\cdot T_A \\ T_B = 836K \end{array}\right.$

$\left.\begin{array}{l} P_C = 2 \times P_B \\ T_C = 2 \cdot T_B \end{array}\right) V = cst$

η^{Carnot} (ODG) $= 1 - \frac{300}{1672} \ll 0,82$ (82%)!

fictif

ODG

$[T_C^{th} = 1672K$

$T_C < T_C^{th}$

(*) Pour augmenter η^{th} il faut $\alpha = \frac{V_{max}}{V_{min}} \nearrow$

Pb la compression déclenche l'inflammation

Pb : Avance à l'allumage

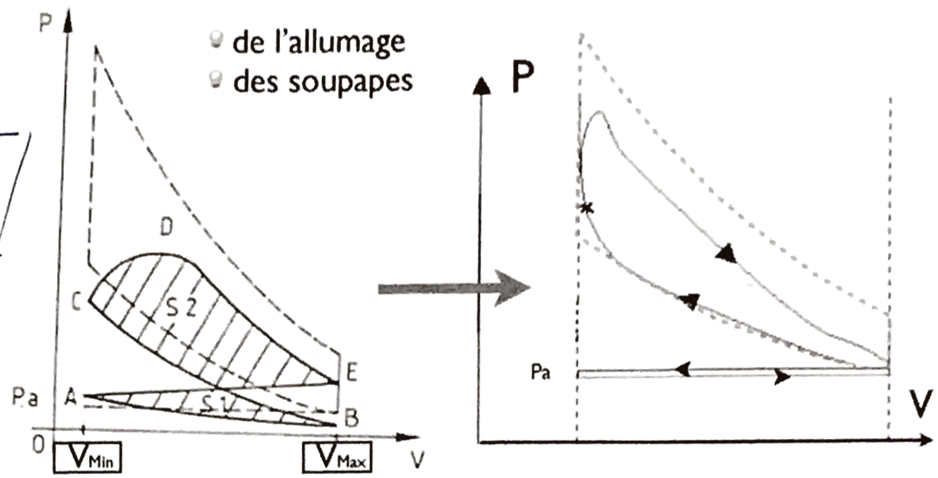
↳ solut° diesel.

↳ Influence du taux de compression ?

Le cycle moteur réel : ($\eta^{th} < 64\%$)

Mauvais réglage :

Bon réglage :



ODG de la consommation : On raisonne en moyenne.

P = 100 ch atteinte à 130Km/h pour 3000 Tr/min

(1ch = 736 W)

* durée d'un tour $\tau = \frac{60\,s}{3000} = 2.10^{-2}\,s$

(2 trs/cycle 4s) $t_{cycle} = 4.10^{-2}\,s$

* $P = 100\,ch = 7,36.10^{4}\,W$

$\eta_{réel} = 75\%.\eta_{max} = 0,48$ (64%)

$W_{cycle} = -P.2\tau = -2944\,J < 0$ (−) (!)

$\eta = \frac{-W}{Q}$

$Q_{explosion} = \frac{-W}{\eta} = 6133\,J$

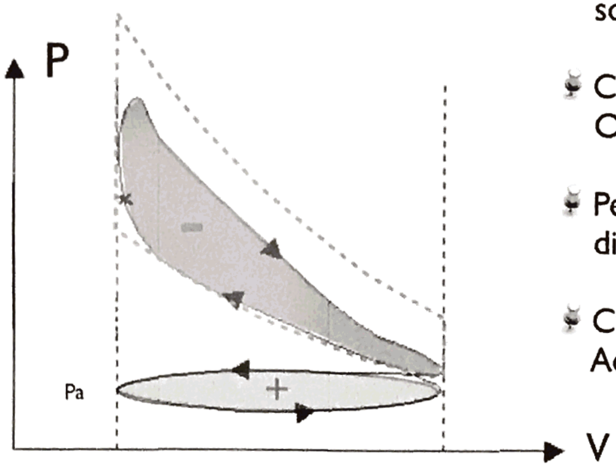
$N_{explosion/100km} = \frac{\frac{100}{130} \times 3600}{2 \times 2.10^{-2}} = 69.231$ (s/heure)

Donnée essence : 33 MJ / Litre

$Q_{tot} = 4,24.10^{8}\,J$

Consommation C = 12,8 l Litres aux 100km

En pratique on a toujours $\eta < 35\%$



- Les isochores n'en sont pas tout à fait
- Combustion incomplète On atteint pas Pmax
- Pertes de chaleur par diffusion thermique
- Cycle résistant Admission-échappement