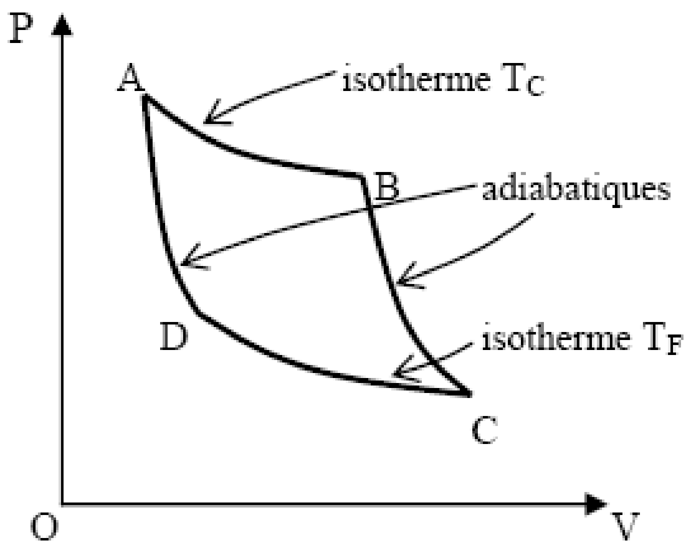
ETUDE DES CYCLES DES MOTEURS

1. Conditions générales

Nous avons montré dans le chapitre précédent, que pour un moteur (fournir du travail), le système soit en contact avec au moins deux sources de chaleurs; le fluide fournit du travail à l'extérieur en recevant une quantité de chaleur de la source chaude et en donnant une quantité de chaleur à la source froide. Aussi, nous avons établit l'expression du rendement de cycle de Carnot donnée par:

$$\eta = \frac{T_c - T_F}{T_c}$$

Ainsi si on peut élever la différence de température entre le fluide et l'extérieur le rendement sera meilleur.
On utilise des produits pétrolier comme carburant: essence, gas-oil parfois gaz. Dans la réalité on n'utilise pas le cycle de Carnot car il nécessiterait une pression trop importante pour la température haute (point A sur le diagramme), les moteurs usuels ne permettent pas une telle compression.



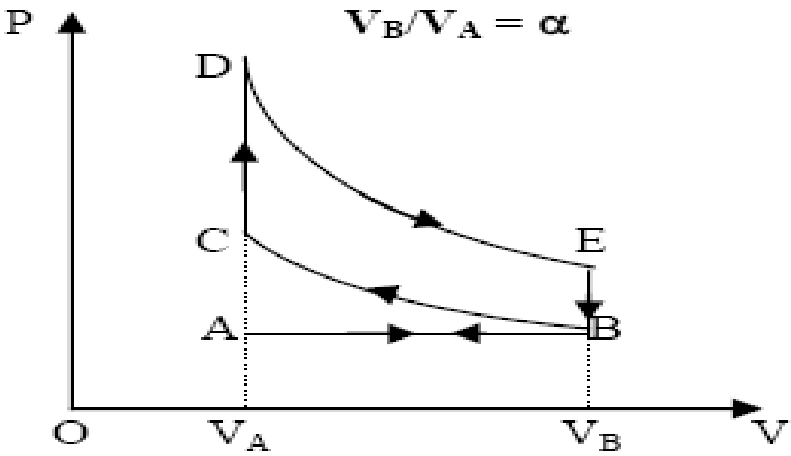
On préfère donc modifier le cycle et on enlève les deux transformations isothermes AB et CD qu'on remplace par:

- Deux isochores et on obtient, ainsi, le moteur à essence
- Une isobare et une isochore et c'est le moteur Diesel

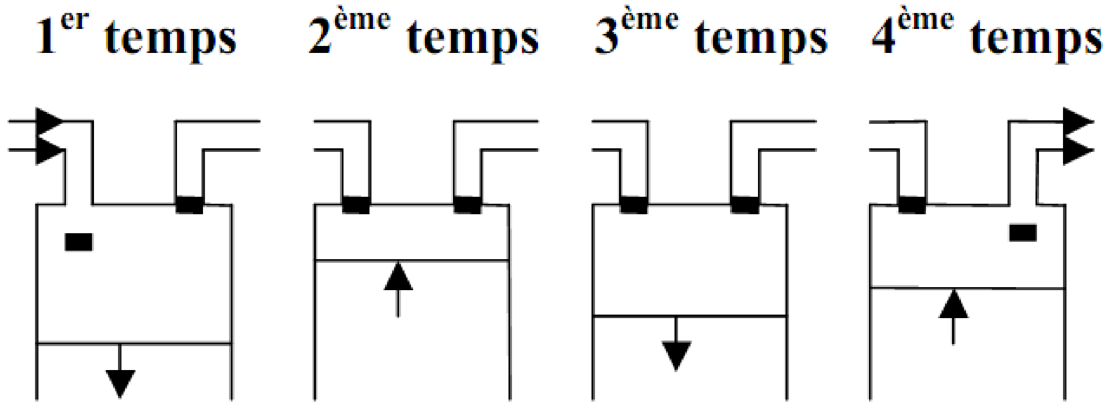
Ces systèmes sont en fait des systèmes ouverts avec combustion interne. Leur évolution est irréversible. On idéalise cependant le moteur par un modèle de cycle fermé à air. C'est surtout la méthode de combustion qui distingue les moteurs, comme on va le voir.

1. Cycle d'Otto ou Beau de Rochas (ALPHONSE BEAU DE ROCHAS  **1815 – 1893)**

Le cycle du moteur à essence, décrit par le diagramme ci-dessous, se compose de:



- $A \rightarrow B$ Admission de A à B; la soupape d'admission s'ouvre, un peu de combustible (essence vaporisée) est aussi aspirée. A la fin de cette phase, la soupape d'admission se ferme et on travaille avec l'air enfermé à la température T_B
- $B \rightarrow C$ Compression adiabatique réversible; le piston remonte et le gaz est comprimé, la phase est rapide et comme les échanges thermiques sont lents, la transformation est adiabatique.
- $C \rightarrow D$ Combustion interne du mélange; explosion, à cet instant une étincelle provoque l'explosion du mélange, il y a accroissement de la pression par l'explosion, à volume constant
- $D \rightarrow E$ Détente adiabatique réversible; détente et effet moteur, l'air chauffé se détend en repoussant le piston et en fournissant un travail
- $E \rightarrow B$ Refroidissement; la soupape d'échappement s'ouvre, la pression interne retombe instantanément à la pression atmosphérique (donc à volume constant), puis le piston remonte en repoussant l'air restant
- $B \rightarrow A$ Echappement



Rendement théorique

Le cycle est considéré réversible et le gaz est supposé parfait

- $B \rightarrow C$ Compression adiabatique réversible $Q_{BC} = 0$
- $C \rightarrow D$ Combustion interne du mélange à volume constant; $W_{CD} = -\int PdV = 0 \Rightarrow Q_{CD} = \Delta U = C_V(T_D - T_C)$
- $D \rightarrow E$ Détente adiabatique réversible; $Q_{DE} = 0$
- $E \rightarrow B$ Refroidissement à volume constant; $W_{EB} = -\int PdV = 0 \Rightarrow Q_{EB} = \Delta U = C_V(T_B - T_E)$

$$\Delta U_{cycle} = W_T + Q_T = 0$$

$$\Delta U_{cycle} = W_T + Q_{CD} + Q_{EB} = 0$$

$$W_T = -Q_{CD} - Q_{EB}$$

La quantité de chaleur utilisée est Q_{CD}

$$\eta = \left|\frac{-Q_{CD} - Q_{EB}}{Q_{CD}}\right|$$

$$\eta = \left|-\frac{Q_{CD} + Q_{EB}}{Q_{CD}}\right|$$

$$\eta = \frac{Q_{CD} + Q_{EB}}{Q_{CD}}$$

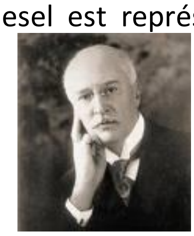
$$\eta = 1 + \frac{Q_{EB}}{Q_{CD}}$$

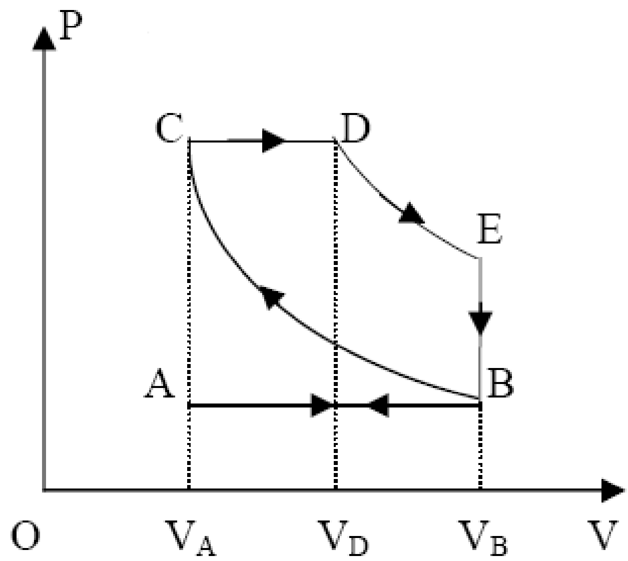
$$\eta = 1 + \frac{T_B - T_E}{T_D - T_C}$$

2. Cycle de Diesel

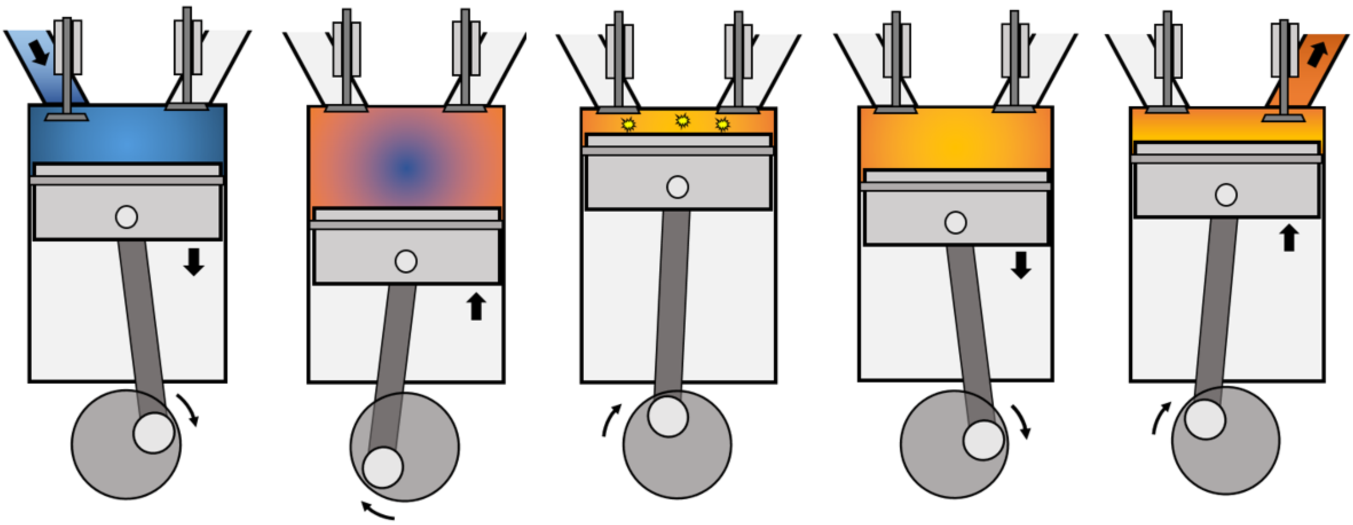
Le fonctionnement d'un moteur Diesel est représenté par le cycle idéal de la figure ci-dessous en coordonnées P-V:

(RUDOLF DIESEL 1858 - 1913)





- Admission de A à B; On injecte uniquement de l'air sans combustible
- Compression adiabatiques réversible de l'air de B à C; compression plus forte que dans le cas du moteur à essence, T est plus forte aussi.
- Combustion à pression constante, par injection de carburant de C à D; le gas-oil est injecté et s'enflamme automatiquement (T, P élevées) sans besoin d'étincelle donc de bougies.
- Détente adiabatique réversible de D à E
- Refroidissement de E à B
- Echappement de B à A



1 - Admission   2 - Compression   Allumage   3 – Combustion et Détente   4 - Echappement

Rendement théorique

Le cycle est considéré réversible et le gaz est supposé parfait

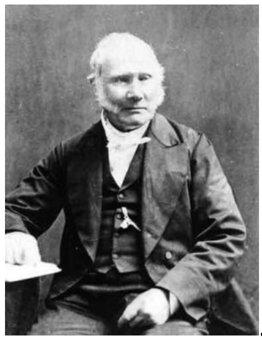
- $B \rightarrow C$ Compression adiabatique réversible $Q_{BC} = 0$
- $C \rightarrow D$ Combustion à pression constante; $Q_{CD} = C_P(T_D - T_C)$
- $D \rightarrow E$ Détente adiabatique réversible; $Q_{DE} = 0$
- $E \rightarrow B$ Refroidissement à volume constant; $W_{EB} = -\int PdV = 0 \Rightarrow Q_{EB} = \Delta U = C_V(T_B - T_E)$

$$\Delta U_{cycle} = W_T + Q_T = 0$$
$$\Delta U_{cycle} = W_T + Q_{CD} + Q_{EB} = 0$$
$$W_T = -Q_{CD} - Q_{EB}$$

La quantité de chaleur utilisée est Q_{CD}

$$\eta = \left|\frac{-Q_{CD} - Q_{EB}}{Q_{CD}}\right|$$
$$\eta = \left|-\frac{Q_{CD} + Q_{EB}}{Q_{CD}}\right|$$
$$\eta = \frac{Q_{CD} + Q_{EB}}{Q_{CD}}$$
$$\eta = 1 + \frac{Q_{EB}}{Q_{CD}}$$
$$\eta = 1 + \frac{C_V(T_B - T_E)}{C_P(T_D - T_C)}$$
$$\eta = 1 + \frac{1}{\gamma}\frac{(T_B - T_E)}{(T_D - T_C)}$$

3. Cycle de Stirling

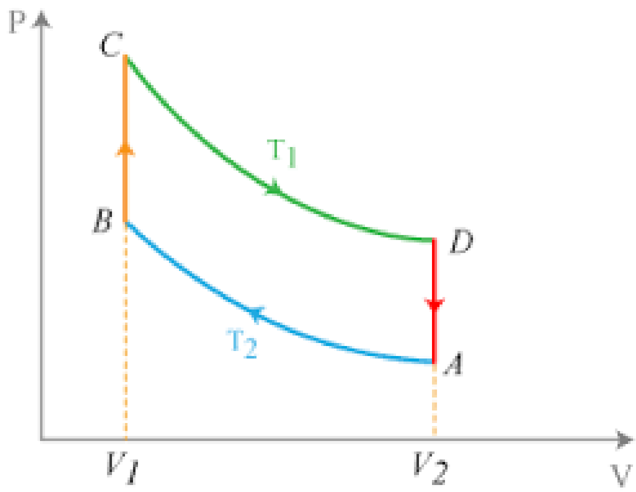
Le moteur de Stirling a été développé vers 1816 par Robert Stirling . Il est aujourd'hui utilisé dans certains sous marins, satellites, groupes électrogènes, bateaux.
Le moteur de Stirling a plusieurs particularités :

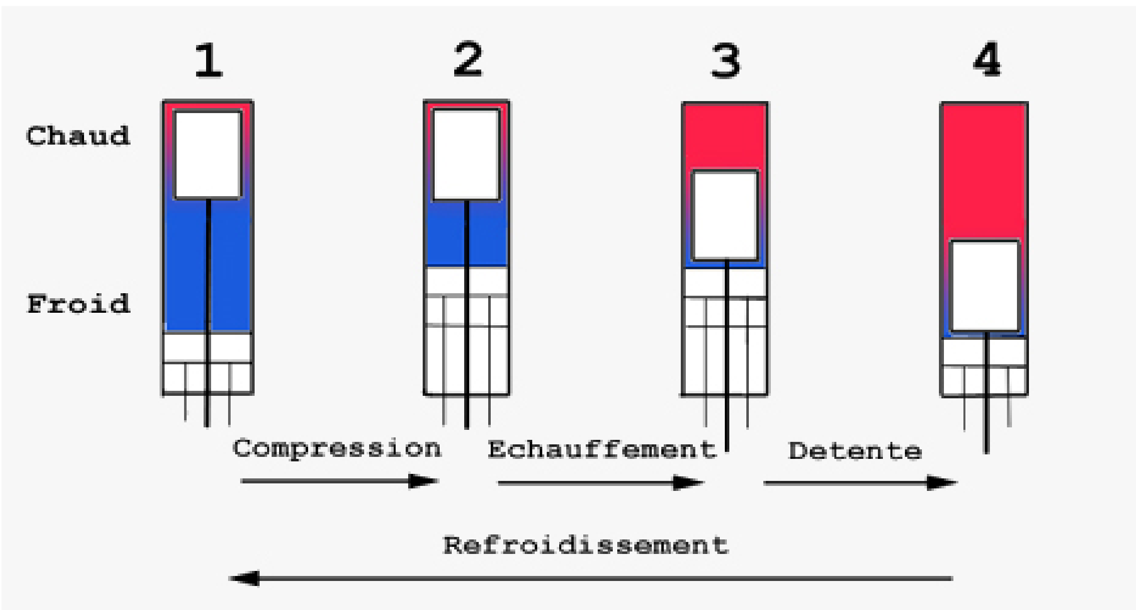
- C'est un moteur à combustion externe: contrairement à un moteur à explosion ou le combustible (le mélange air-carburant par exemple) brûle dans le cylindre, ici le combustible brûle à l'extérieur du moteur.

- Il ne s'agit pas d'un moteur à explosion: il produit donc moins de vibrations et est plus silencieux.
- Le fluide qui est chauffé/refroidi dans le moteur fonctionne en circuit fermé: c'est toujours le même fluide.
- Son rendement est élevé.

Les étapes du cycle sont décrites dans la figure ci-dessous. Composé de :

- $A \rightarrow B$ Compression isotherme réversible
- $B \rightarrow C$ Echauffement isochore.
- $C \rightarrow D$ Détente isotherme réversible
- $D \rightarrow A$ Refroidissement isochore.





Rendement théorique

Le cycle est considéré réversible et le gaz est supposé parfait

- $A \rightarrow B$ Compression isotherme réversible

$$\Delta U_{AB} = Q_{AB} + W_{AB} = C_V dT = 0$$
$$Q_{AB} = -W_{AB}$$
$$W_{AB} = -\int_{V_2}^{V_1} PdV = -nRT\int_{V_2}^{V_1} \frac{dV}{V}$$
$$W_{AB} = -nRTln\frac{V_1}{V_2}$$
$$Q_{AB} = nRTln\frac{V_1}{V_2}$$

- $B \rightarrow C$ Echauffement isochore.; $W_{BC} = 0$

$$\Delta U_{BC} = Q_{BC} + W_{BC} = C_V dT$$
$$Q_{BC} = C_V(T_C - T_B)$$

- $C \rightarrow D$ Détente isotherme réversible;

$$\Delta U_{CD} = Q_{CD} + W_{CD} = C_V dT = 0$$
$$Q_{CD} = -W_{CD}$$
$$W_{CD} = -\int_{V_1}^{V_2} PdV = -nRT\int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$
$$W_{CD} = -nRTln\frac{V_2}{V_1}$$
$$Q_{CD} = nRTln\frac{V_2}{V_1}$$

- $D \rightarrow A$ Refroidissement isochore; $W_{DA} = 0$

$$\Delta U_{DA} = Q_{DA} + W_{DA} = C_V dT$$
$$Q_{DA} = C_V(T_A - T_D)$$

$$\Delta U_{cycle} = W_T + Q_T = 0$$
$$\Delta U_{cycle} = W_T + Q_{AB} + Q_{CD} = 0$$
$$W_T = -Q_{AB} - Q_{CD}$$

La quantité de chaleur utilisée est $Q_{BC} + Q_{CD}$(les deux quantités de chaleur positifs)

$$\eta = \left|\frac{-Q_{AB} - Q_{CD}}{Q_{BC} + Q_{CD}}\right|$$
$$\eta = \left|-\frac{Q_{AB} + Q_{CD}}{Q_{BC} + Q_{CD}}\right|$$

$$\eta = \frac{Q_{AB} + Q_{CD}}{Q_{BC} + Q_{CD}}$$

$$\eta = \frac{nRTln\frac{V_1}{V_2} + nRTln\frac{V_2}{V_1}}{C_V(T_C - T_B) + nRTln\frac{V_2}{V_1}}$$

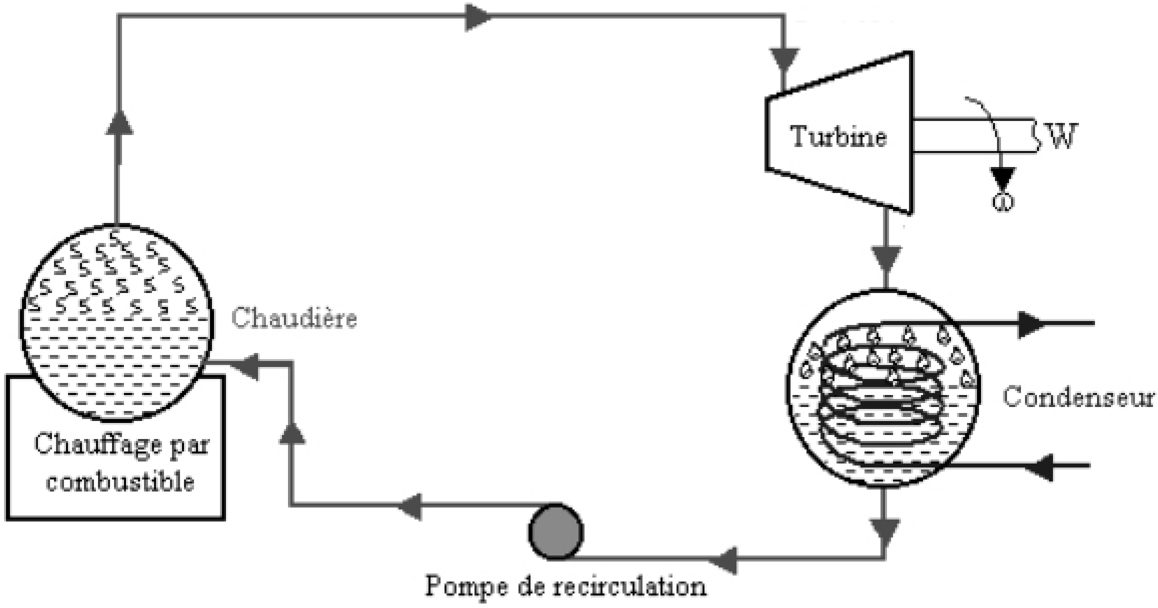
4. Cycle de Rankine: Cycle de turbine à vapeur

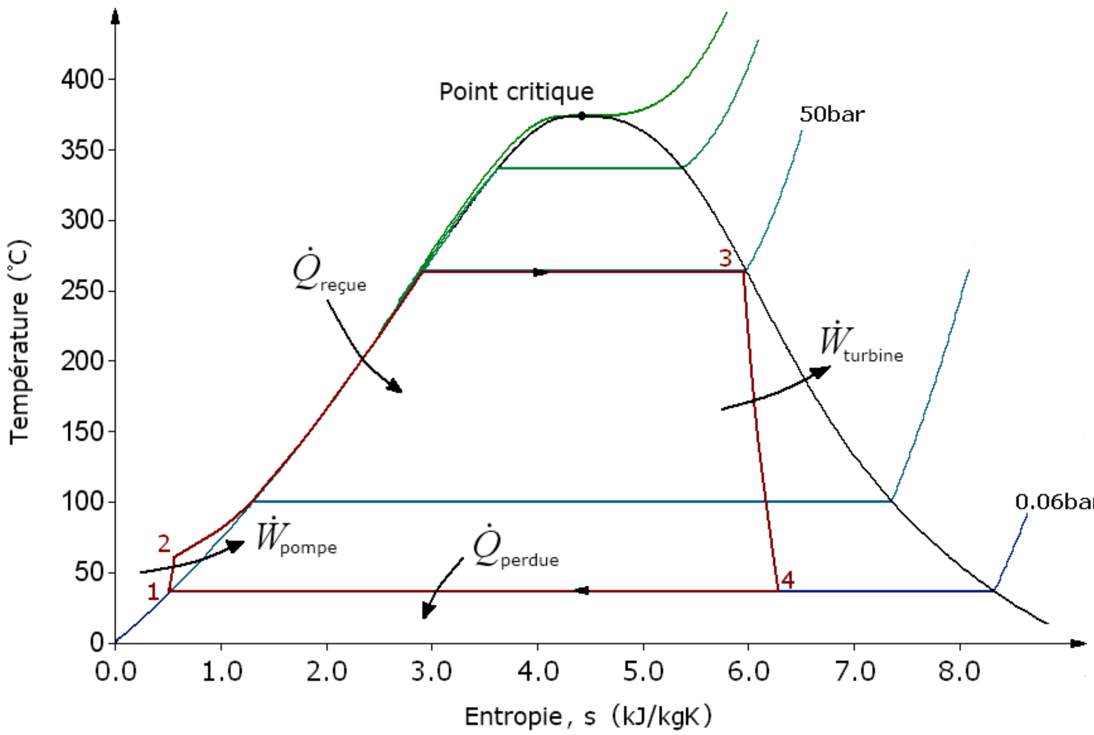
Le cycle de Rankine **(**ingénieur écossais, William John Macquorn Rankine, 1859**)** décrit les performances des systèmes de turbines à vapeur, bien que le principe théorique s'applique également aux moteurs alternatifs tels que les locomotives à vapeur. En général, le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique idéalisé d'un moteur thermique à pression constante qui convertit une partie de la chaleur en travail mécanique. Dans ce cycle, la chaleur est fournie de l'extérieur à une boucle fermée, qui utilise généralement de l'eau (en phase liquide et vapeur) comme fluide de travail. Le fluide de travail du cycle de Rankine subit le changement de phase d'une phase liquide à une phase vapeur et vice versa.

Alors que de nombreuses substances pourraient être utilisées comme fluide de travail dans le cycle de Rankine (inorganiques ou même organiques), l'eau est généralement le fluide de choix en raison de ses propriétés favorables, telles que sa chimie non toxique et non réactive, son abondance et son faible coût, ainsi que ses propriétés thermodynamiques.

Le cycle de Rankine se compose de deux processus isentropiques (adiabatiques réversibles) alternés avec deux processus isobares. Les différentes étapes du cycle sont les suivantes:

- $A \rightarrow B$: Echauffement isobare de l'eau
- $B \rightarrow C$: Vaporisation à 295
- $C \rightarrow D$: Détente isentropique de la vapeur saturante en entrée turbine
- $D \rightarrow E$: Fin de condensation isobare
- $E \rightarrow A$: Compression isentropique du liquide dans la pompe.





Rendement théorique

$A \to C$ On décompose la transformation $A \to C$ en deux étapes: échauffement isobare du liquide puis vaporisation à la pression $P_A = P_B = P_C$.

L'enthalpie est particulièrement importante lorsqu'il s'agit de décrire des transformations à pression constante.

$$H = U + PV$$
$$dH = C_P dT$$

C_P est la capacité calorifique à pression constante

$$dH = dU + d(PV)$$
$$dU = \delta W + \delta Q = \delta Q - PdV$$
$$dH = \delta Q - PdV + PdV + VdP$$
$$dH = \delta Q + VdP$$

Transformation isobare $dP = 0$

$$dH = \delta Q = C_P dT = H_C - H_A$$

$C \rightarrow D$: Détente isentropique de la vapeur saturante en entrée turbine

$$dH = \delta Q + VdP$$

Transformation adiabatique $\delta Q = 0$

$$\Delta H = V\Delta P = H_D - H_C$$

$D \rightarrow E$: Fin de condensation isobare

Calcul de la quantité de chaleur échangée au condenseur

$$dH = \delta Q + VdP$$

$$dH = \delta Q = C_P dT = H_E - H_D$$

$E \rightarrow A$: Compression isentropique du liquide dans la pompe

$$dH = \delta Q + VdP$$

Transformation adiabatique $\delta Q = 0$

$$dH = VdP = H_A - H_E$$

Le système fournit du travail lors de la transformation $C \rightarrow D$, $V\Delta P = H_D - H_C$ est nécessairement le travail fournit.

Le système reçoit; une quantité de chaleur lors de la transformation $A \rightarrow C$; $H_C - H_A$ et un travail (pompe) lors de la transformation $E \rightarrow A$; $H_A - H_E$

$$\eta = \frac{H_D - H_C}{H_C - H_A + H_A - H_E}$$
$$\eta = \frac{H_D - H_C}{H_C - H_E}$$

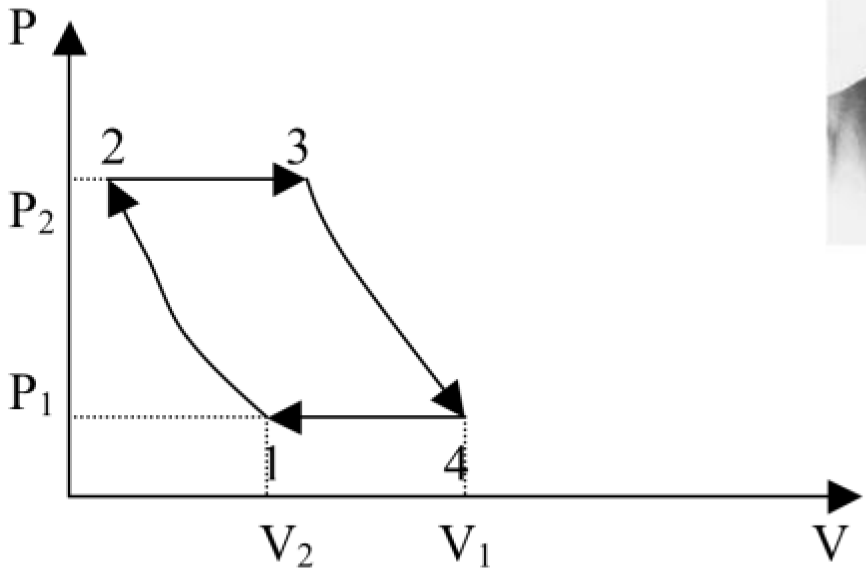
5. Cycle de Joule (ou de Brayton); turbine à gaz

Dans les turbines, le travail sert à la mise en rotation d'une machine tournante (par exemple un alternateur pour produire de l'électricité).

Le cycle réversible de Brayton est composé des quatre transformations suivantes :

- une compression isentropique
- un apport de chaleur ou combustion isobare
- une détente isentropique
- un retrait de chaleur isobare.

Il s'agit d'un système ouvert qui présente l'avantage technique d'assurer des échanges de chaleur à pression constante.



Rendement théorique

Le système fournit du travail lors de la transformation $1 \rightarrow 2$ et $3 \rightarrow 4$

Le système reçoit; une quantité de chaleur lors de la transformation $2 \rightarrow 3$

$$\Delta U_{cycle} = W_T + Q_T = 0$$
$$\Delta U_{cycle} = W_T + Q_{12} + Q_{34} = 0$$
$$W_T = -Q_{12} - Q_{34}$$

La quantité de chaleur utilisée est Q_{23}

$$\eta = \left|\frac{-Q_{12} - Q_{34}}{Q_{23}}\right|$$

$$\eta = \left|-\frac{Q_{12} + Q_{34}}{Q_{23}}\right|$$

$$\eta = \frac{Q_{12} + Q_{34}}{Q_{23}}$$

A pression constante $Q = C_P \Delta T$

$$\eta = \frac{C_P(T_2 - T_1) + C_P(T_4 - T_3)}{C_P(T_3 - T_2)}$$

$$\eta = \frac{T_2 - T_1 + T_4 - T_3}{T_3 - T_2}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$