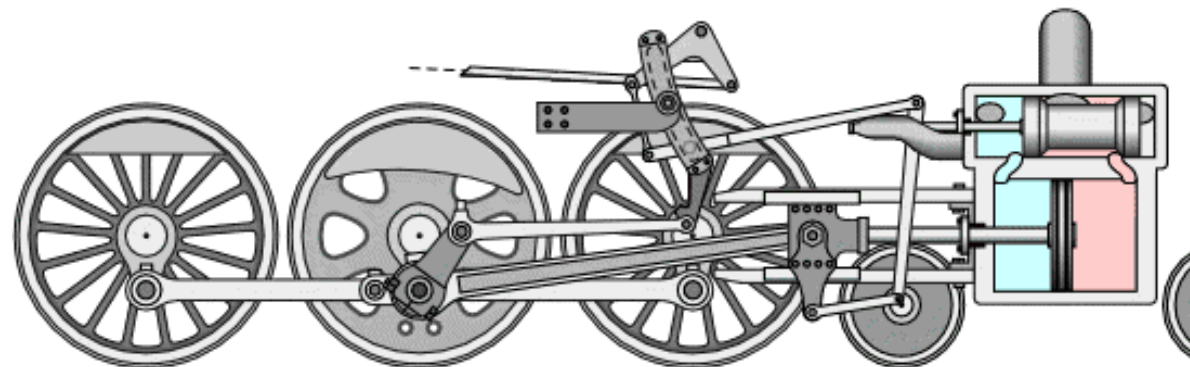
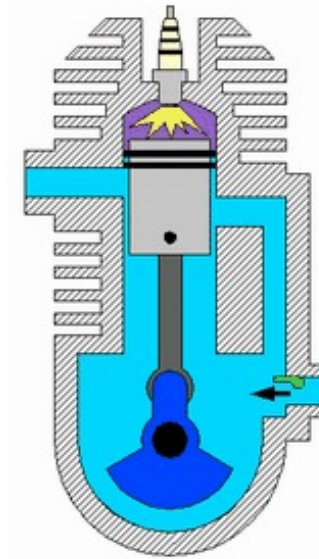
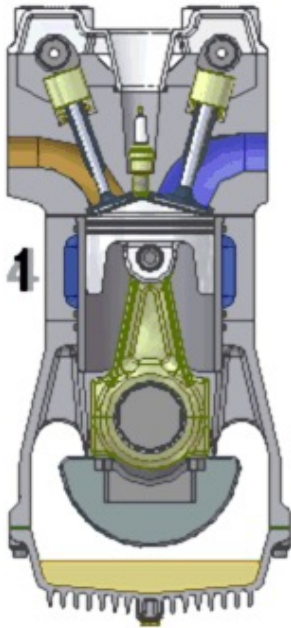


- Exemples et applications.
 - Machines thermiques.
 - ✧ Pompe à chaleur.
 - ✧ Cycle de Beau de Rochas.
 - ✧ Cycle de Diesel.
 - ✧ Autres cycles.

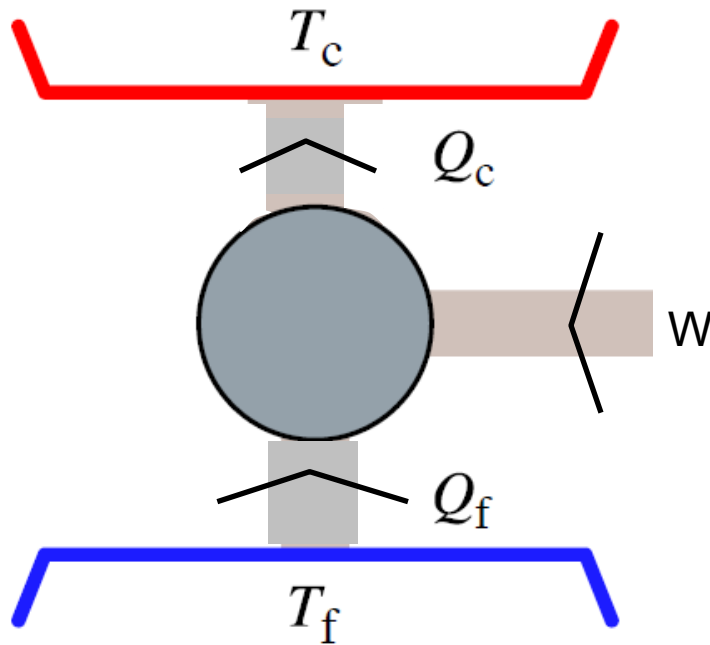


1

Exemples d'applications.

- *Pompe à chaleur*
- *Moteurs*
 - *Moteur d'Otto*
 - *Diesel*
 - ...

- On s'intéresse à la chaleur *fournie* à la source *chaude*



$$Q_f > 0 \quad Q_c < 0 \quad W > 0$$

Source froide "gratuite"

- Efficacité :

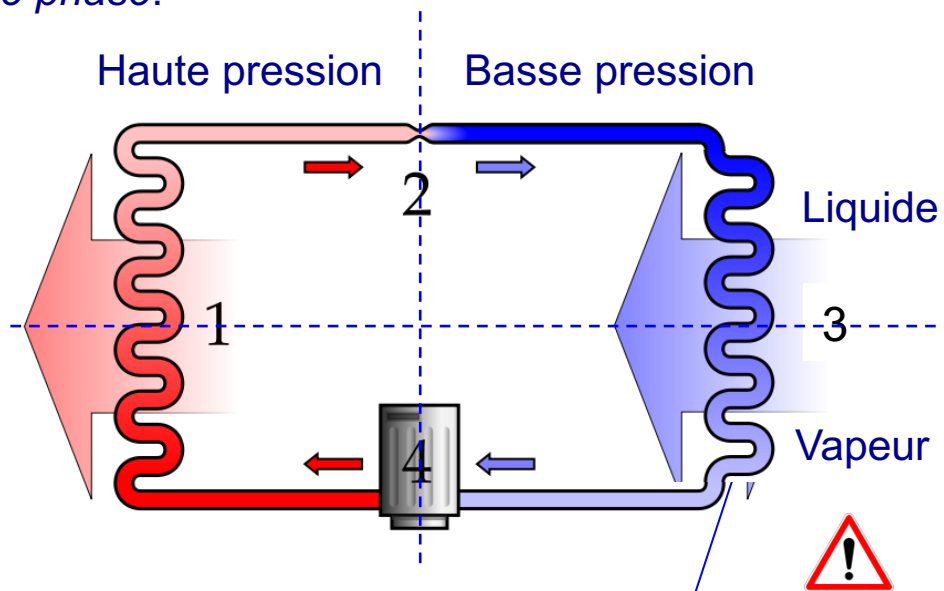
$$\eta_{\text{PAC}} = -Q_c/W$$

- Soit :

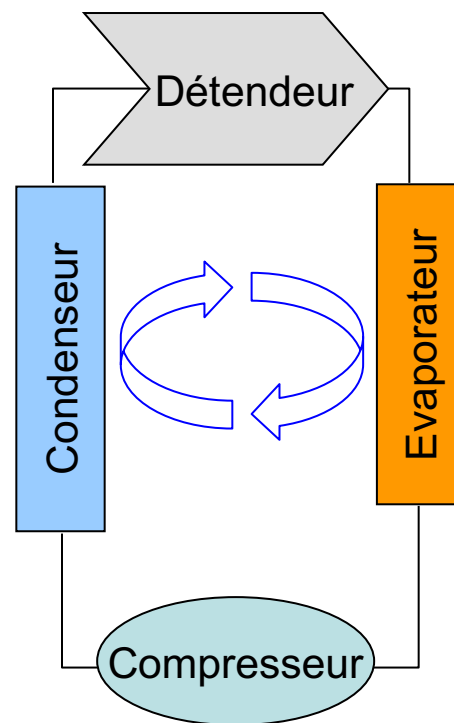
$$\eta_{\text{PAC}} = T_c/(T_c - T_f)$$

Amélioration du fonctionnement :

- Principe de base : il faut trouver un gaz tel que lors de sa détente, il devient plus froid que la source froide, et, après compression est plus chaud que la pièce à chauffer (on ne fait pas du chaud avec du froid).
- On utilise aussi un changement d'état (liquide \leftrightarrow gaz) pour mettre à profit l'énergie du changement d'état. Le fluide cède de l'énergie en se condensant (T_c) et en absorbe en s'évaporant (T_f). L'énergie de changement d'état ne permet pas de faire mieux que Carnot mais cela permet de manipuler des quantités plus grandes d'énergie par quantité de matière utilisée.
- On utilise un compresseur qui fournit un *petit travail* mais qui permet de *grands échanges de chaleur* grâce à des *transitions de phase*.



Dessin ambiguë pris de la littérature $Q_f > 0$

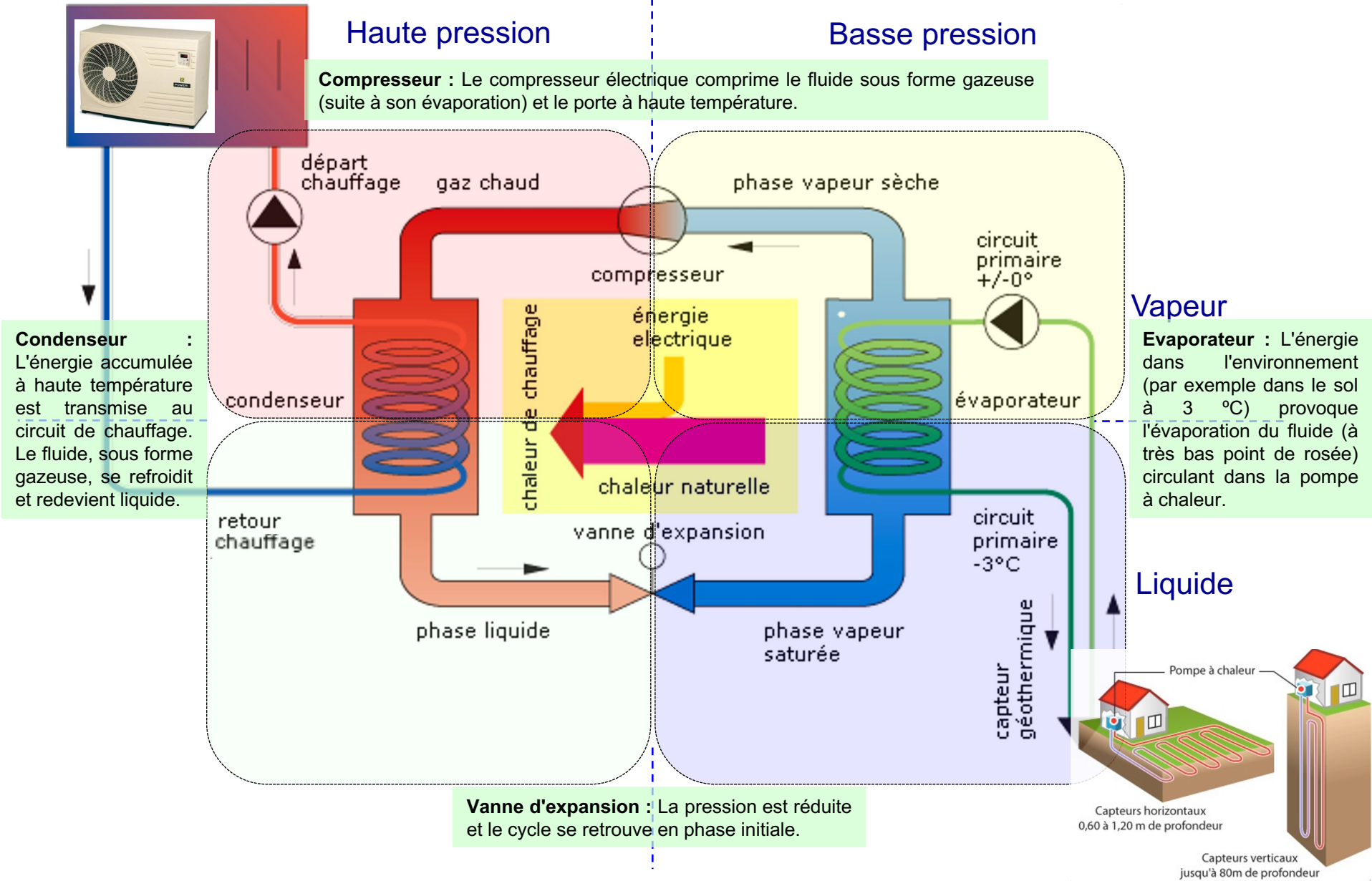


Retour sur l'**efficacité plus grande que 1** : $\eta_{PAC} = \frac{T_c}{T_c - T_f} > 1 \quad (T_c > T_f)$

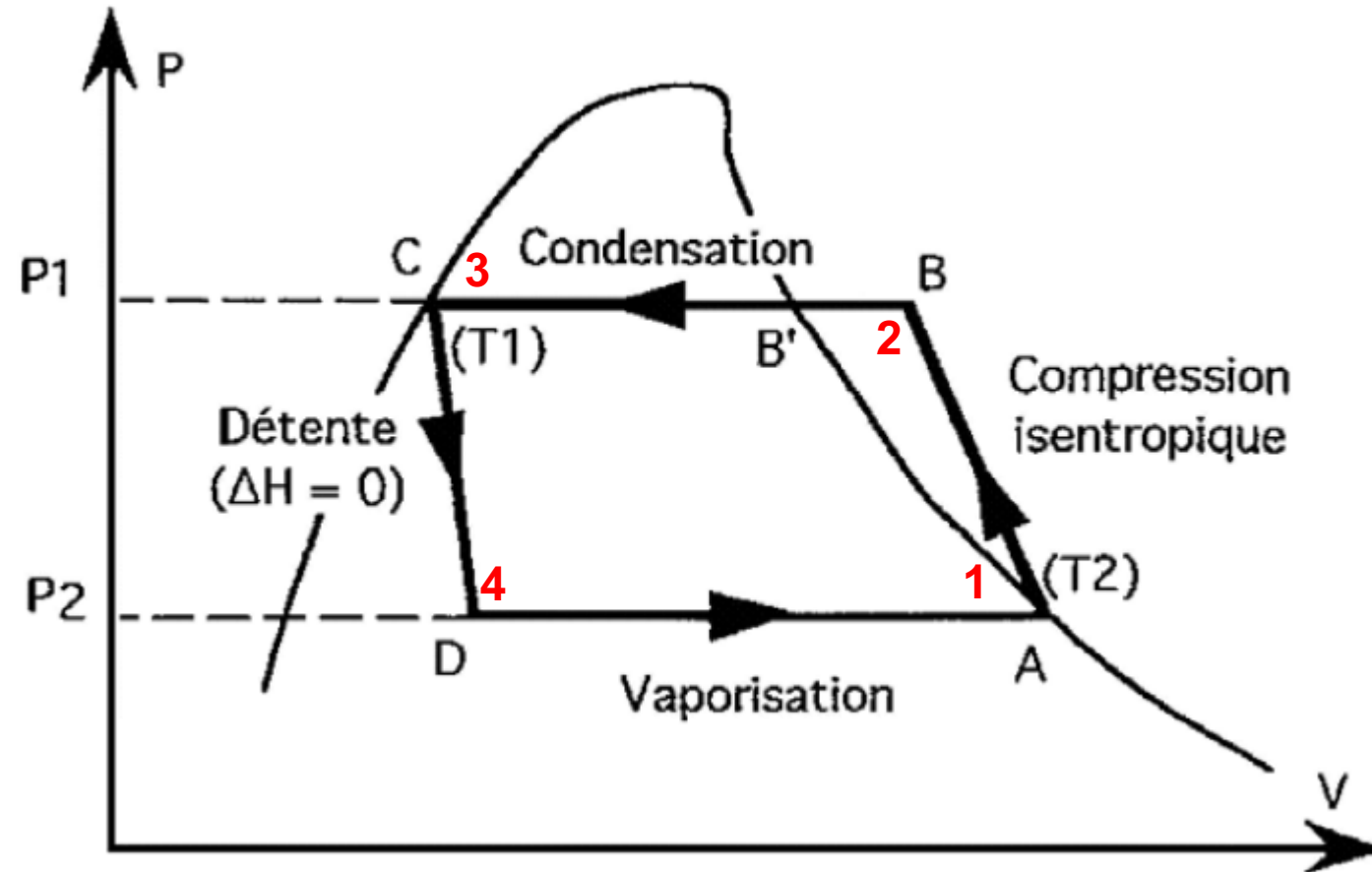
Si on faisait du chauffage direct on transforme tout le travail W en chaleur à la source chaude, Q_c , et $\eta = 1$.

Avec la PAC on fait mieux que ça (c'est à dire $\eta > 1$) en utilisant W pour engendrer un transfert de chaleur du **froid vers le chaud**. Ce qui est interdit spontanément par le second principe, c'est l'apport de W qui le rend possible.

Ce transfert de chaleur du **froid vers le chaud** est d'autant plus contre nature que l'écart entre T_f et T_c est grand. Ce n'est donc pas surprenant que plus on se rapproche d'une situation où ce serait permis $T_f \approx T_c$, il soit plus facile de générer ce transfert du froid vers le chaud et donc avec une efficacité plus grande. A la limite l'efficacité tend vers l'infini quand $T_f = T_c$ car au delà (" $T_f > T_c$ ") le transfert se fait spontanément avec $W = 0$.

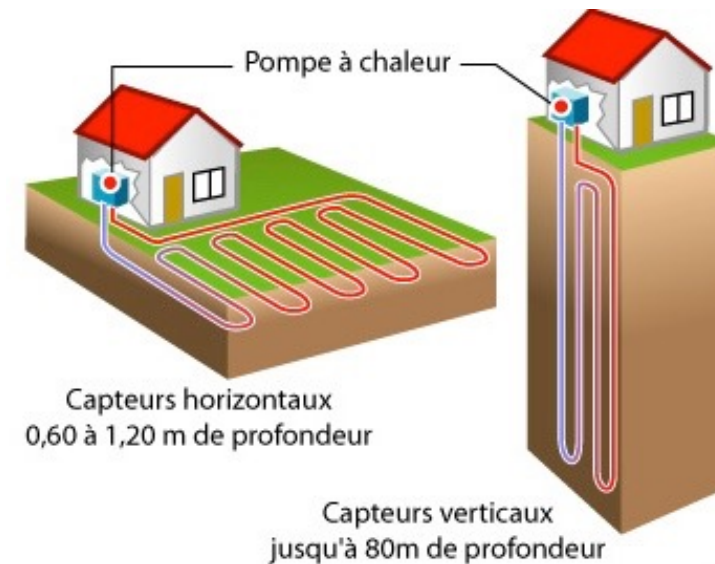


On est loin du cycle de Carnot avec des gaz parfaits.



- Sources de chaleur

- **Air.**
- **Sol.** Avec une ou plusieurs sondes verticales pouvant atteindre 150 m de profondeur ou par un captage horizontal à une profondeur hors gel d'environ 1 mètre.
- **Eau.** Les nappes phréatiques sont des sources de chaleur appropriées pour le chauffage par pompe à chaleur.

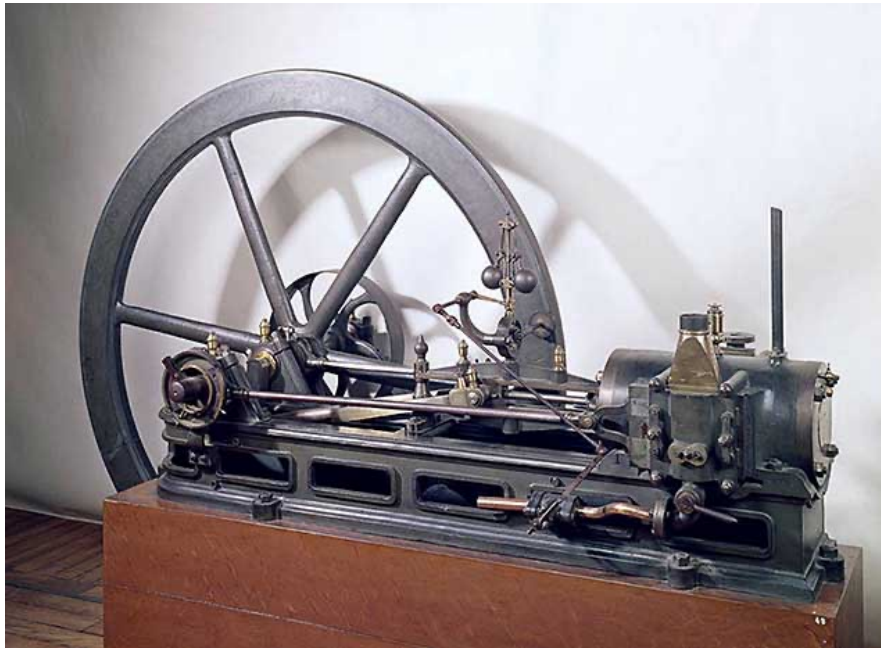


1

Exemples d'applications.

- *Pompe à chaleur*
- *Moteurs*
 - *Moteur d'Otto*
 - *Diesel*
 - ...

- Le 1^{er} **moteur à combustion interne** est un moteur deux temps réalisé et commercialisé par E. Lenoir (1859) fonctionnant au gaz.



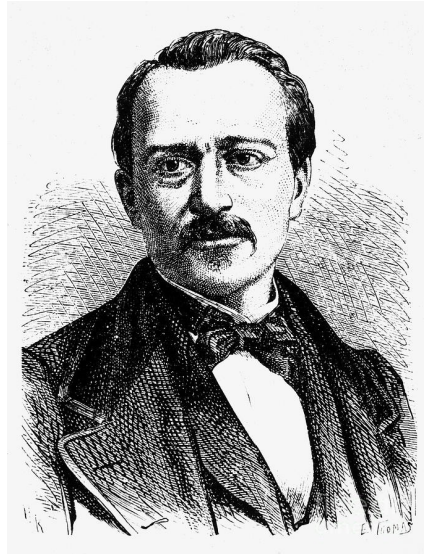
Musée des Arts et Métiers, Paris

www.youtube.com/watch?v=ANFqJ1QKwHQ

www.youtube.com/watch?v=oL6hVGIXV78



- 1^{er} **moteur quatre temps** proposé par A. Beau de Rochas en 1862 et réalisé par E. Lenoir (1863) avec des améliorations en 1876 attribuées à N.Otto (brevet invalidé).



Etienne Lenoir
1822 - 1900

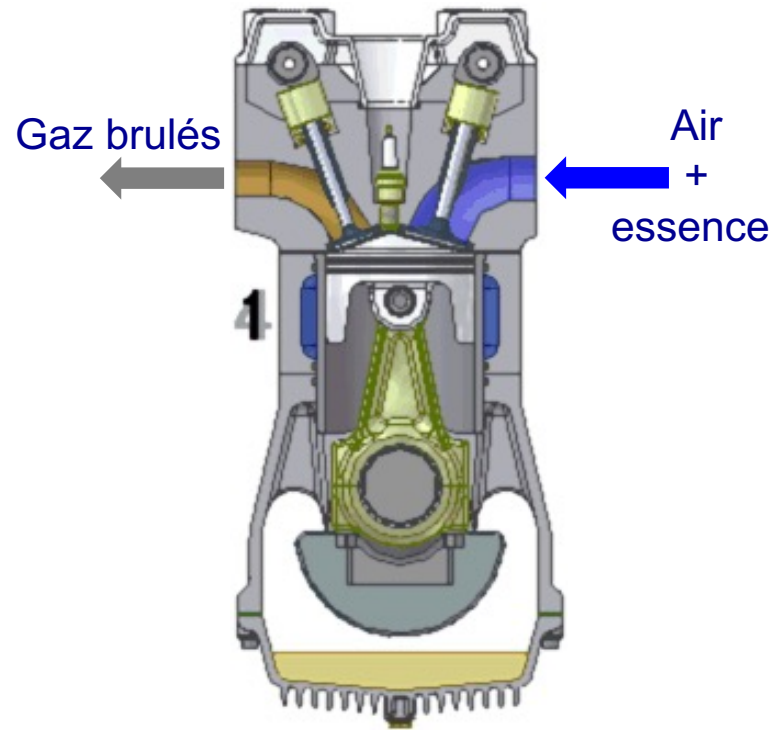


Alphonse Beau de Rochas
1815 -1893

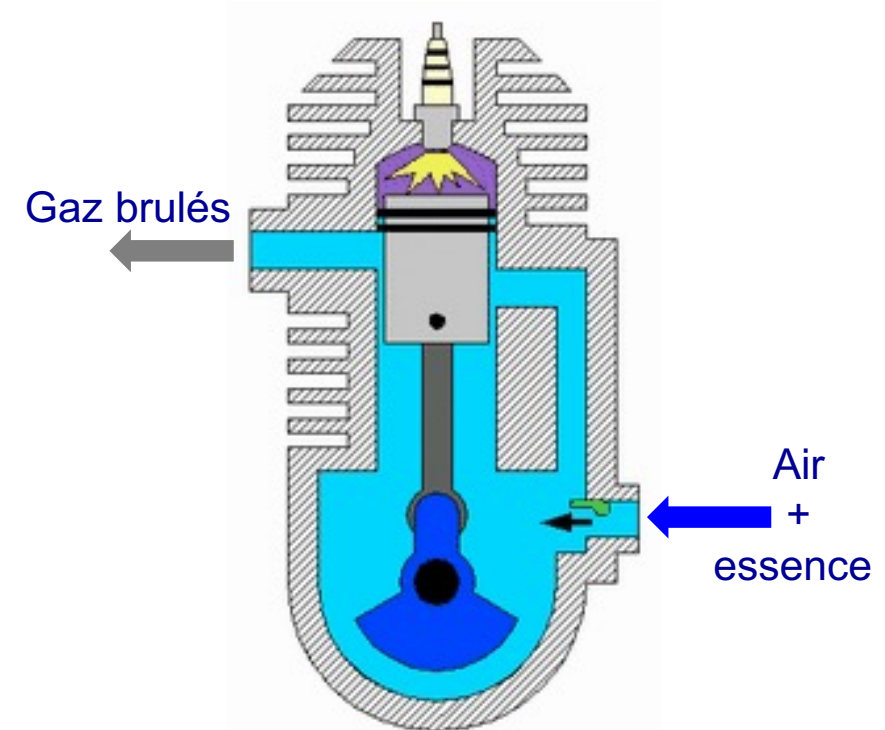


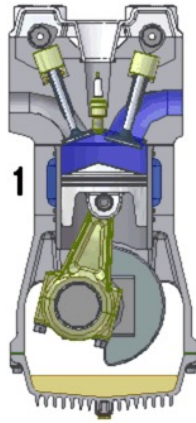
Nikolaus Otto
1832 -1891

Moteur 4 temps

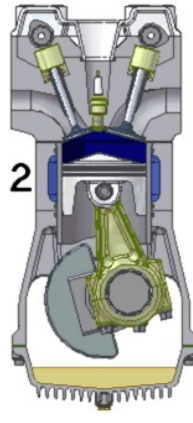


Moteur 2 temps

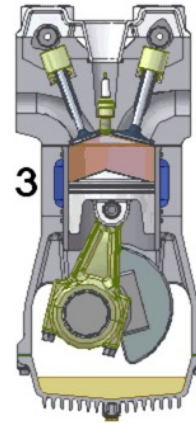


Moteur 4 temps

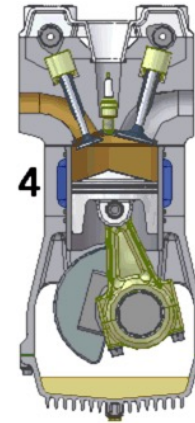
Admission



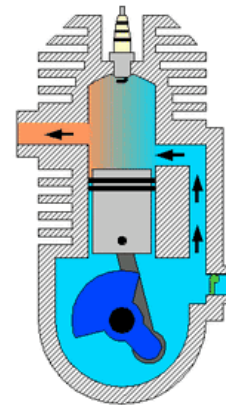
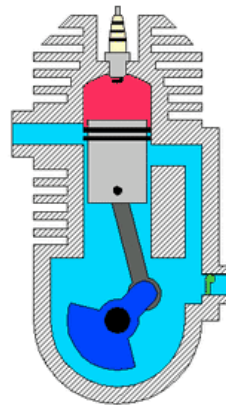
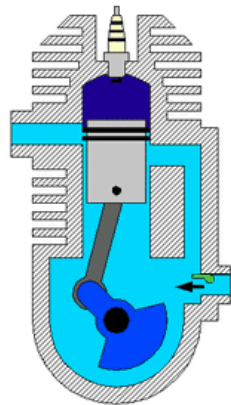
Compression

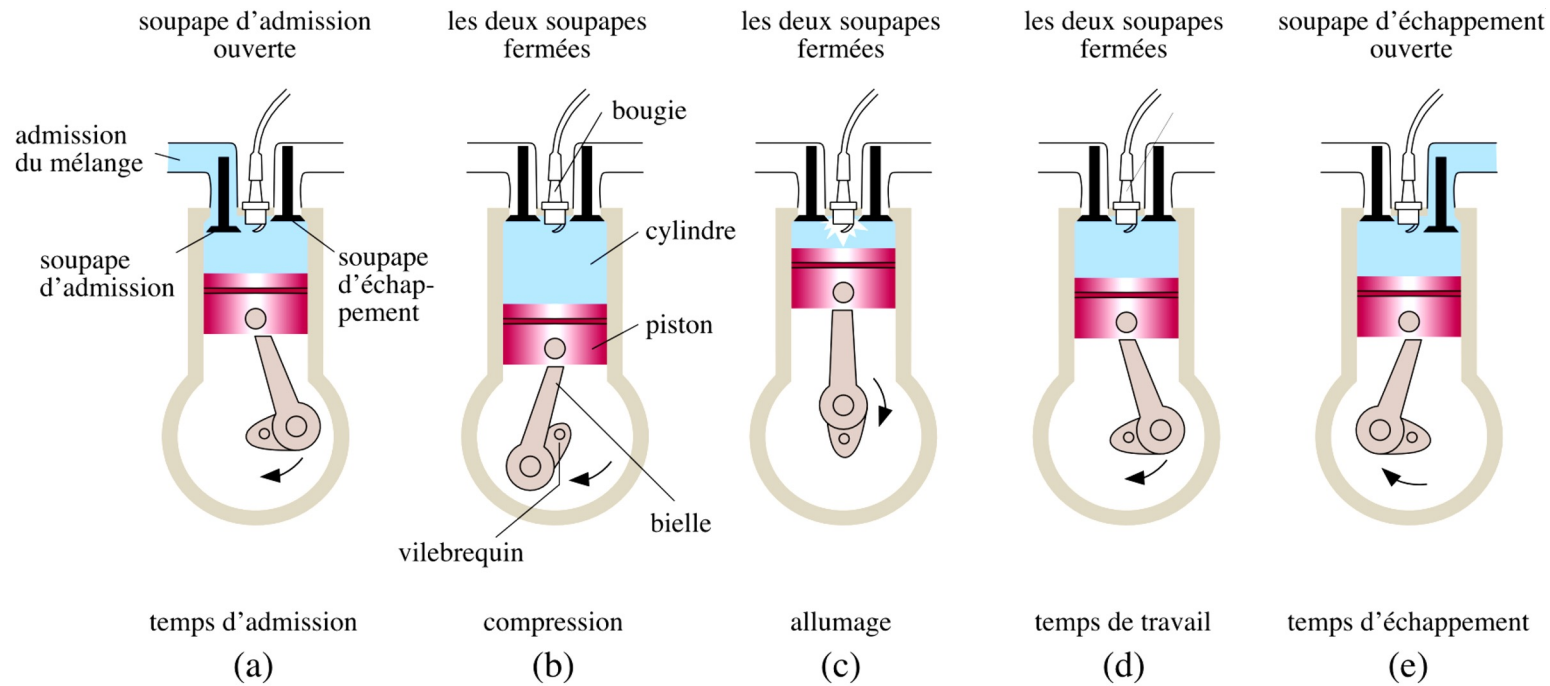


Détente

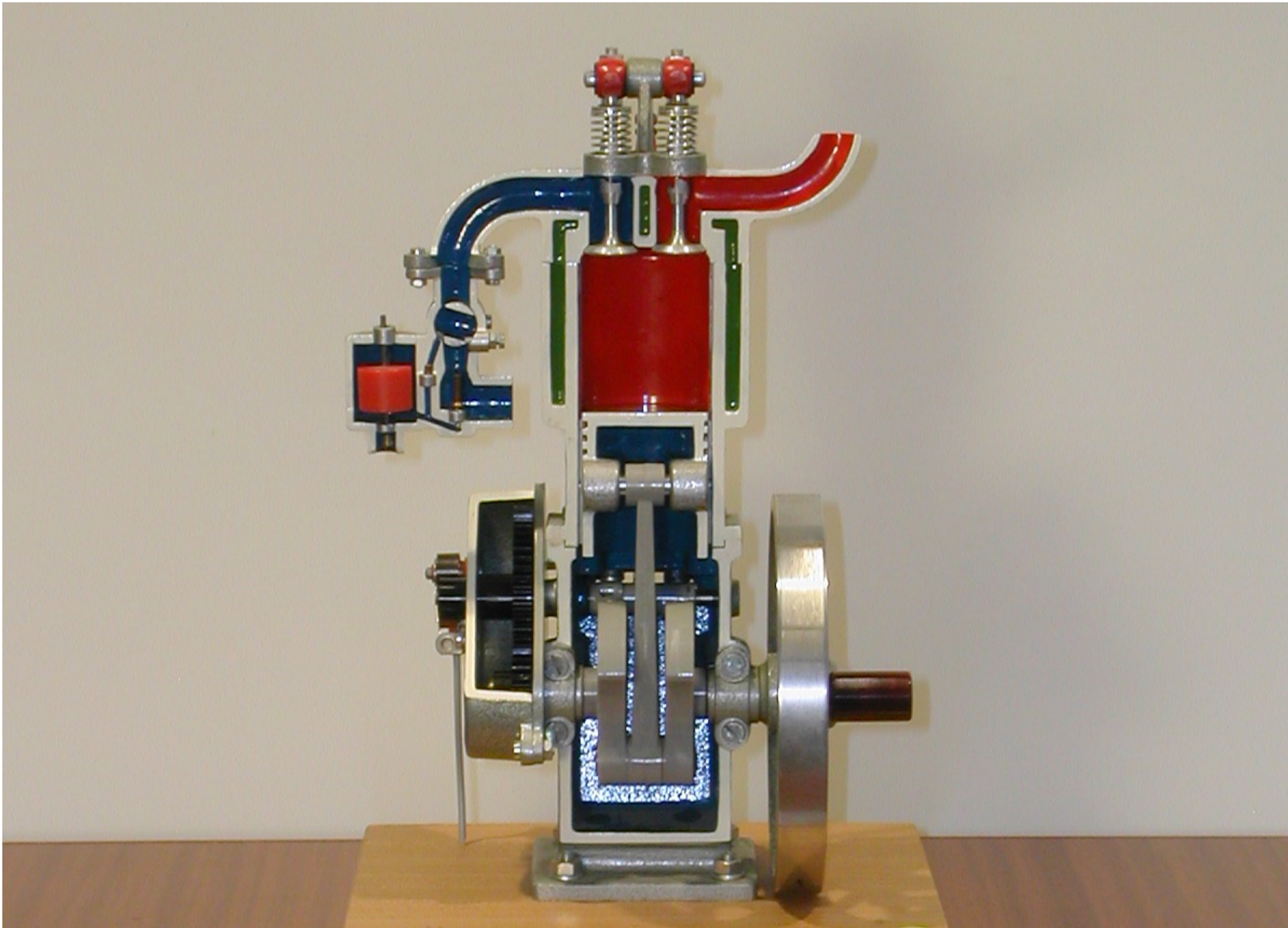


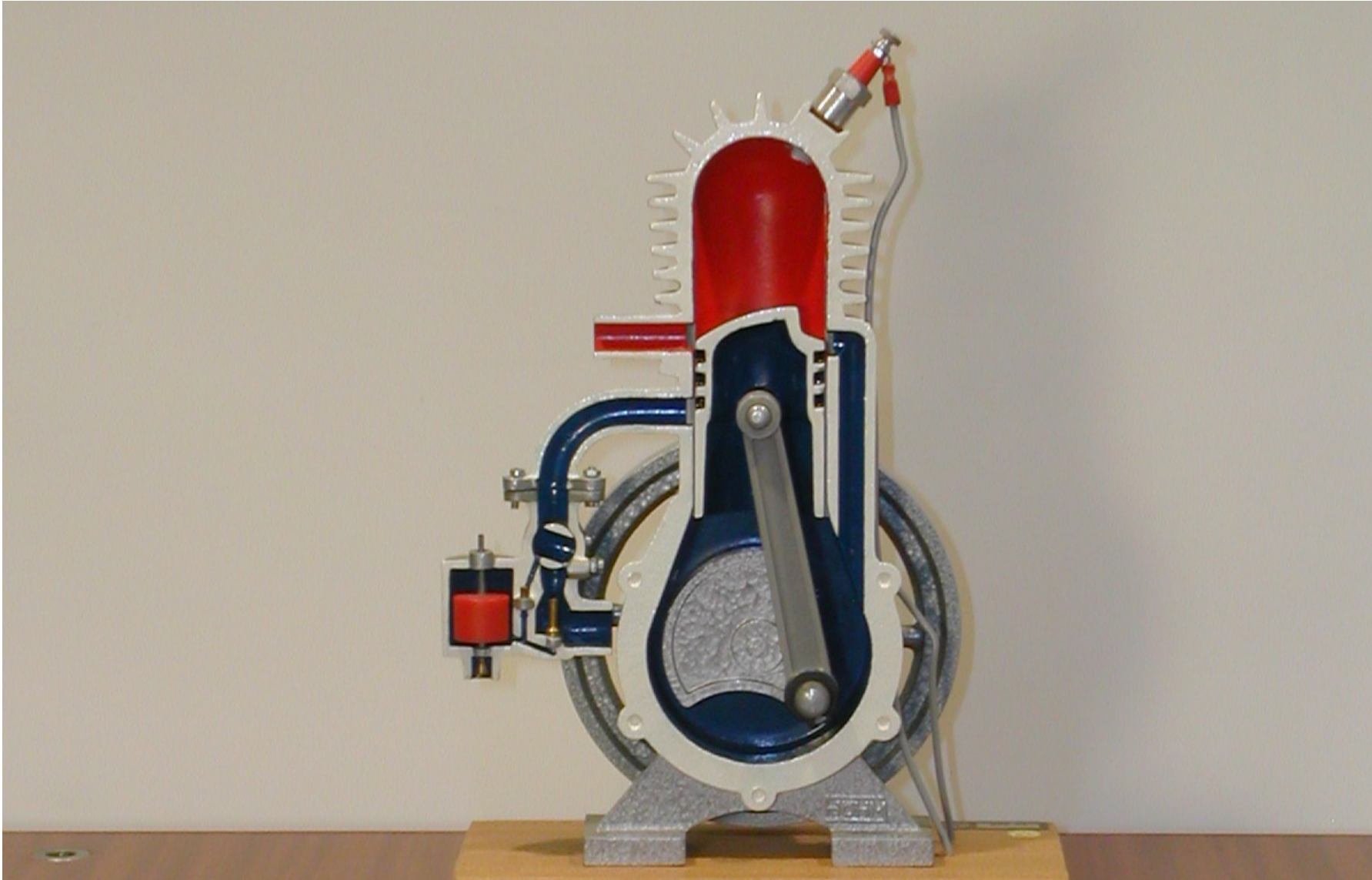
Echappement

Moteur 2 temps

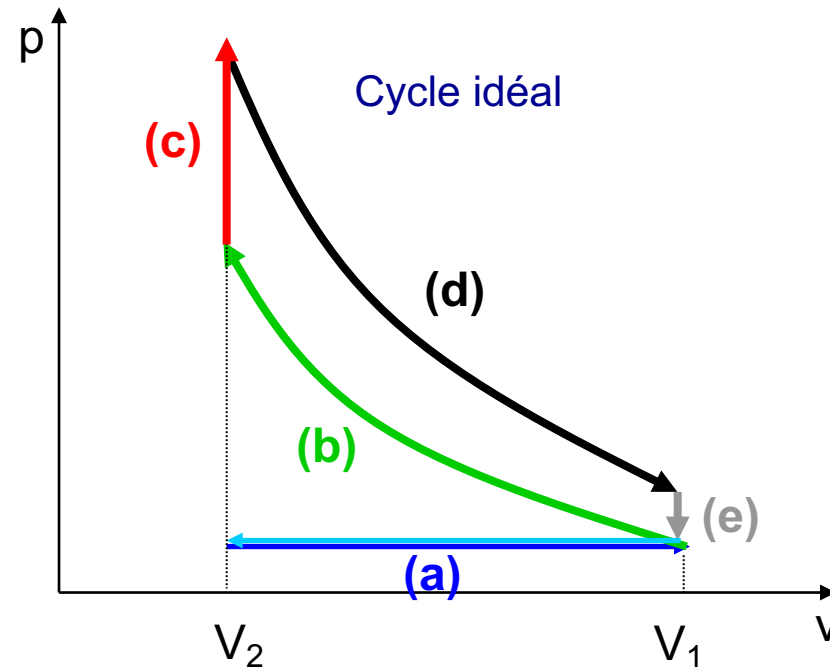


- On injecte le mélange (air + essence) dans un volume V_1 (soupape d'admission ouverte)
- On comprime le mélange jusqu'au volume V_2
- On fait exploser le mélange au volume V_2 avec l'étincelle de la bougie
- Les gaz issus de l'explosion se détendent de V_2 à $V_1 \Rightarrow$ **le moteur fournit du travail**
- Les gaz sont évacués par une compression de V_1 à V_2 (soupape d'échappement ouverte)

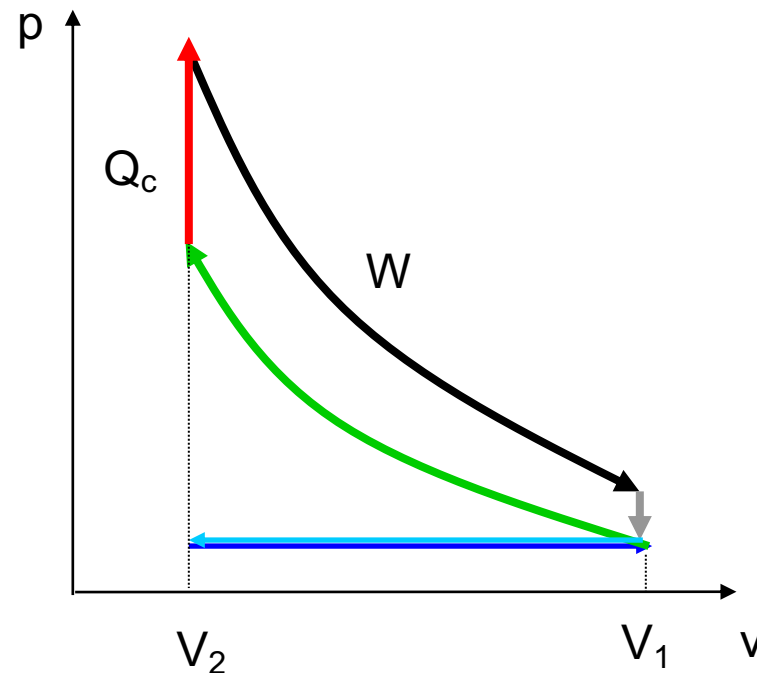




- **Quel est le cycle ? Quelles transformations sont en jeu?**
 - (a) Injection à pression constante de V_2 à V_1
 - (b) Compression: comme le moteur tourne très vite (>1500 tr/min), la compression est adiabatique, et si quasi-statique, isentropique
 - (c) Explosion: compression isochore
 - (d) Expansion des gaz: détente adiabatique (isentropique)
 - (e) Échappement: détente isochore



- Le calcul de l'efficacité est obtenu en faisant le rapport du travail fourni sur la chaleur reçue :
 - La *chaleur* provient de l'explosion du mélange.
 - Le *travail* fourni au cours de la détente est W (< 0).



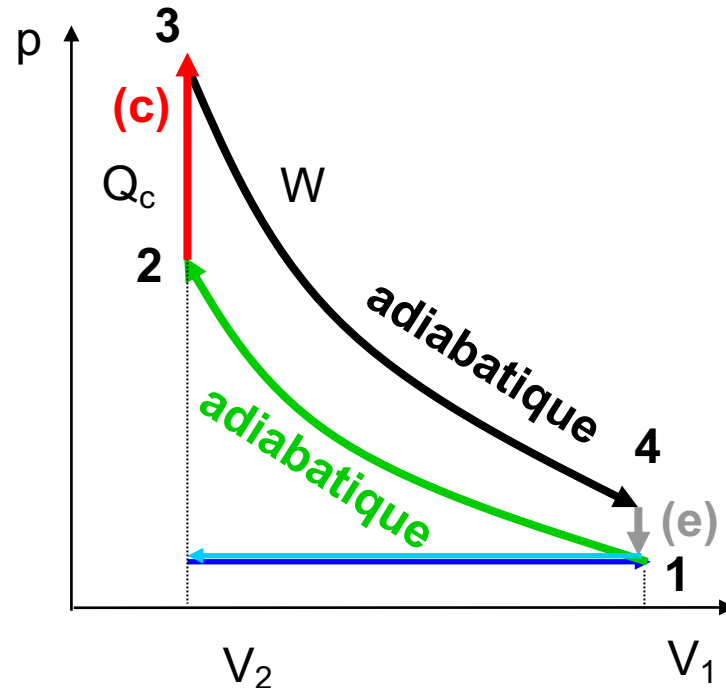
$$\eta_m = -W/Q_c$$

$$\text{avec } W = -(Q_f + Q_c)$$

d'où

$$\eta_m = 1 + Q_f/Q_c$$

- L'efficacité est souvent exprimé en fonction du *taux de compression* : $\alpha = V_1/V_2$



- Lors des phases d'explosion (c) et d'échappement des gaz (e), la variation de volume est négligeable et donc $dV \approx 0$

$$dU = \delta Q + \delta W = \delta Q - p dV = \delta Q$$

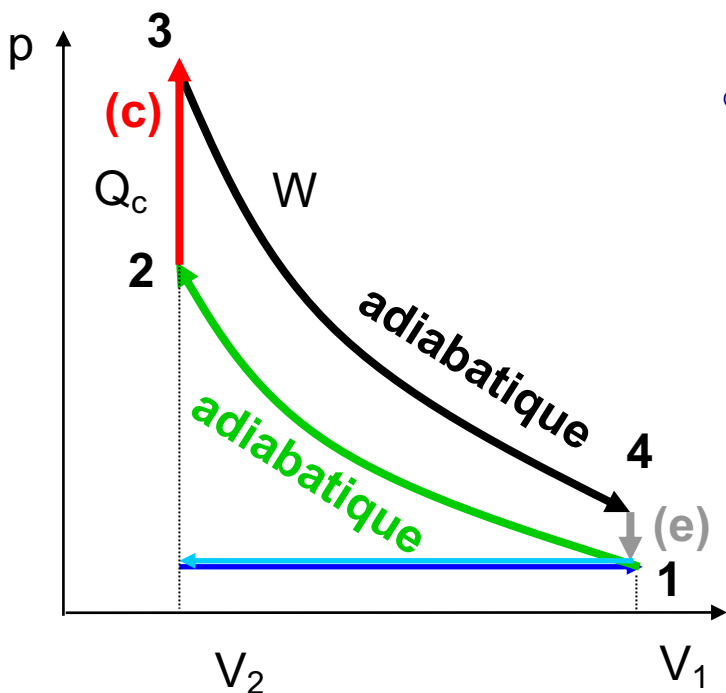
$$dU = C_v dT = \delta Q$$

- Finalement : $Q_c = \Delta U = C_v (T_3 - T_2)$
 $Q_f = \Delta U = C_v (T_1 - T_4)$
- Lors des transformations adiabatiques, $TV^{\gamma-1} = \text{cte}$

$$\text{soit } (V_1/V_2)^{\gamma-1} = T_2/T_1 \text{ et } (V_1/V_2)^{\gamma-1} = T_3/T_4$$

$$\text{d'où } T_2/T_1 = T_3/T_4 = (V_1/V_2)^{\gamma-1} = \alpha^{\gamma-1}$$

- L'explosion conduit à une augmentation très forte de la température du cylindre (T_3, T_4) qui ne redescend qu'après l'admission du mélange (T_1)



- L'efficacité s'écrit

$$\eta_m = 1 + Q_f / Q_c$$

avec $Q_c = C_v (T_3 - T_2)$ et $Q_f = C_v (T_1 - T_4)$

et $\frac{Q_f}{Q_c} = \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$

- De $\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} = \alpha^{\gamma-1}$ on en déduit $\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_1} = \alpha^{\gamma-1}$

et $\frac{Q_f}{Q_c} = -\frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}$

- Finalement l'efficacité est donné par

$$\eta_m = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

- L'efficacité de ce moteur ne dépend que de α , c'est-à-dire du *taux de compression*.
- Si on assimile le mélange à un gaz parfait ($\gamma = 1,4$) et si l'on prend un taux de compression α de ~ 9 , le rendement est de :

$$\eta_{\text{Otto}} = 0,58$$

- Les températures extrêmes sont $T_3 = 1220 \text{ K}$ et $T_1 = 293 \text{ K}$, on peut calculer l'efficacité maximum que permettrait une machine de Carnot :

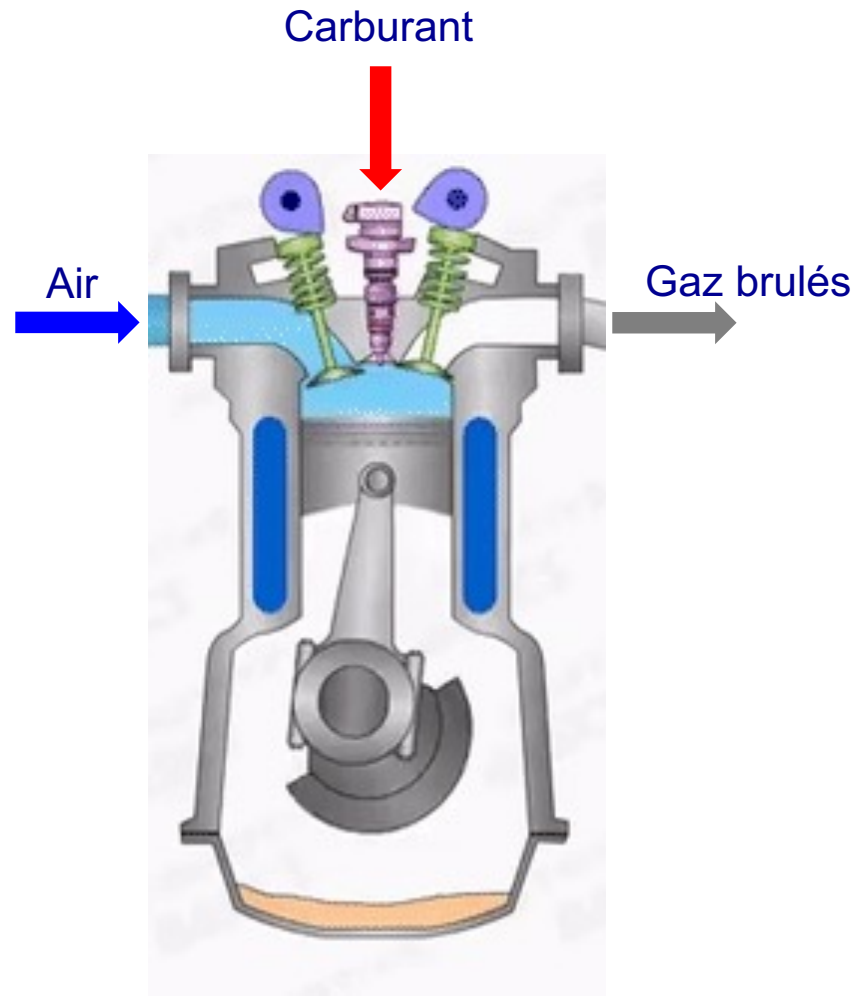
$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - T_f/T_c = 0,76$$

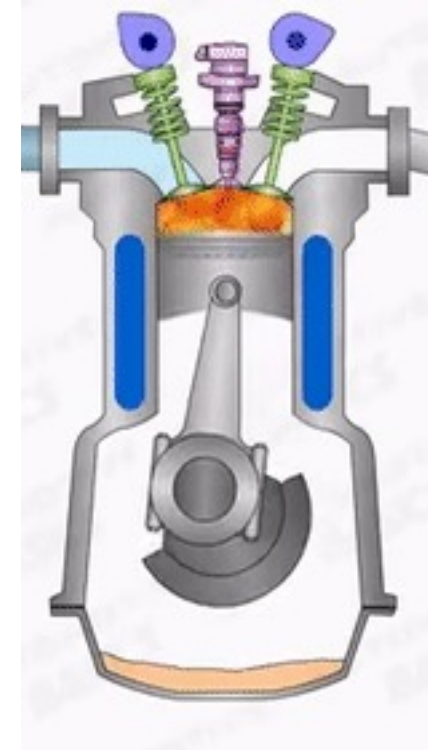
- Nécessité d'*augmenter le taux de compression* pour augmenter l'efficacité , il faut donc empêcher l'autoallumage \Rightarrow indice d'octane élevé et additif (Tétraéthyl de plomb à l'origine).


1

Exemples d'applications.

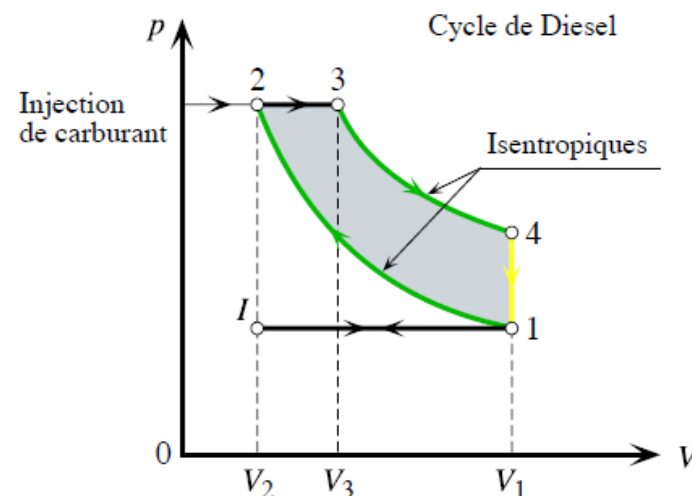
- *Pompe à chaleur*
- *Moteurs*
 - *Moteur d'Otto*
 - *Diesel*
 - ...





- $1 \rightarrow 1$: admission de l'air (soupape admission ouverte)
 - $1 \rightarrow 2$: forte compression (soupapes fermées)
 - $2 \rightarrow 3$: injection du carburant et combustion \Rightarrow **travail**
 - $3 \rightarrow 4$: détente isentropique \Rightarrow **travail**
 - $4 \rightarrow 1 \rightarrow I$: évacuation des gaz de combustion (soupape d'échappement ouverte)
- 
- A detailed cross-sectional diagram of a diesel engine cylinder. The piston is at the bottom of its stroke, and the combustion chamber is filled with a yellowish-orange substance, representing fuel or combustion products. The cylinder head is at the top, and the piston ring is visible. The diagram illustrates the compression stroke where the piston moves upwards, compressing the mixture.

- Rendement en fonction de $\alpha_{1,j} = V_1/V_j$



- Rendement : $\eta_m = -W/Q_c = 1 + Q_f/Q_c$
 - $W < 0$ (le système cède du travail)
 - $Q_f < 0$ (le système cède de la chaleur)
 - $Q_c > 0$ (le système reçoit de la chaleur)

- Q_c est reçue entre 2 et 3 à pression constante : $Q_c = \Delta H = C_p(T_3 - T_2)$
- Q_f est perdue entre 4 et 1 à volume constant : $Q_f = \Delta U = C_v(T_1 - T_4)$

$$\begin{aligned} dH &= dU + d(pV) = \delta Q + \delta W + d(pV) \\ dH &= \delta Q - pdV + pdV + Vdp = \delta Q \\ \text{or } C_p &= \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \Rightarrow dQ = C_p dT \end{aligned}$$

$$\eta_m = 1 + \frac{C_v(T_1 - T_4)}{C_p(T_3 - T_2)}$$

$$\begin{aligned} dU &= \delta Q + \delta W = \delta Q - pdV = \delta Q \\ \text{or } C_v &= \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_p \Rightarrow dQ = C_v dT \end{aligned}$$

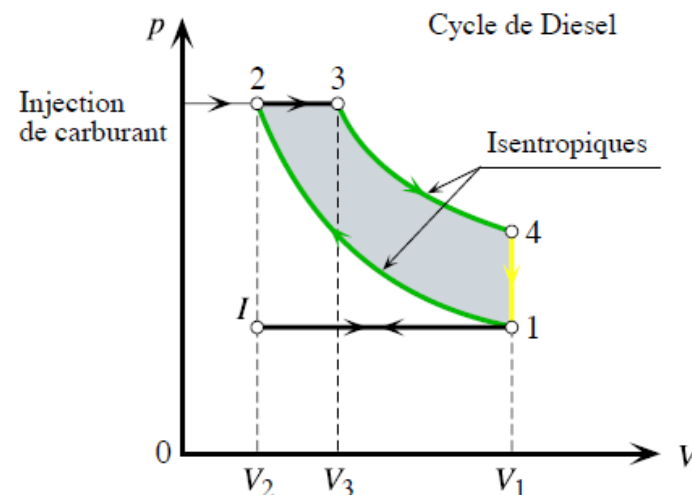
$$\eta_m = 1 + \frac{C_v (T_1 - T_4)}{C_p (T_3 - T_2)}$$

or $\gamma = C_{pm}/C_{vm}$

d'où :

$$\eta_m = 1 + \frac{1}{\gamma} \frac{(T_1 - T_4)}{(T_3 - T_2)}$$

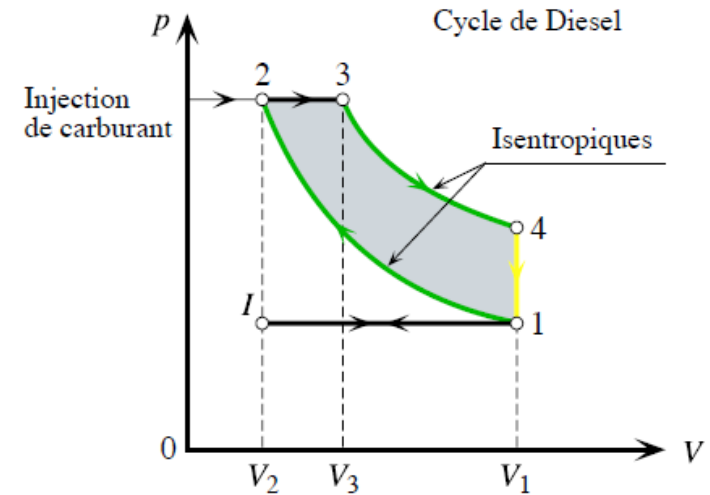
$$\eta_m = 1 - \frac{T_4/T_3 - T_1/T_3}{\gamma(1 - T_2/T_3)}$$



- 2 transformations isentropiques ($\delta Q = 0$) $\Rightarrow TV^{\gamma-1} = \text{cte}$

$$\left. \begin{array}{l} \circ 3 \rightarrow 4 : T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_1^{\gamma-1} \\ \circ 1 \rightarrow 2 : T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \end{array} \right\} \begin{array}{l} T_4 / T_3 = (V_3 / V_1)^{\gamma-1} = \alpha_{1,3}^{1-\gamma} \\ T_1 / T_2 = (V_2 / V_1)^{\gamma-1} = \alpha_{1,2}^{1-\gamma} \end{array}$$

- Lien entre T_2 et T_3
 - $p_2 V_2 / T_2 = p_3 V_3 / T_3$
 - $\Rightarrow T_2 / T_3 = V_2 / V_3 = V_2 / V_1 \times V_1 / V_3 = \alpha_{1,2}^{-1} \alpha_{1,3}$
- $T_1 / T_3 = T_1 / T_2 \times T_2 / T_3 = \alpha_{1,2}^{1-\gamma} \alpha_{1,2}^{-1} \alpha_{1,3} = \alpha_{1,2}^{-\gamma} \alpha_{1,3}$



$$\eta_m = 1 - \frac{\alpha_{1,3}^{1-\gamma} - \alpha_{1,2}^{-\gamma} \alpha_{1,3}}{\gamma(1 - \alpha_{1,2}^{-1} \alpha_{1,3})} = 1 - \frac{\alpha_{1,3}^{-\gamma} - \alpha_{1,2}^{-\gamma}}{\gamma(\alpha_{1,3}^{-1} - \alpha_{1,2}^{-1})}$$

Rendement :

$$\eta_m = -W/Q_c = 1 + Q_f/Q_c$$

$$\eta_m = 1 - \frac{\alpha_{1,3}^{-\gamma} - \alpha_{1,2}^{-\gamma}}{\gamma(\alpha_{1,3}^{-1} - \alpha_{1,2}^{-1})}$$

avec $\alpha_{i,j} = V_i/V_j$

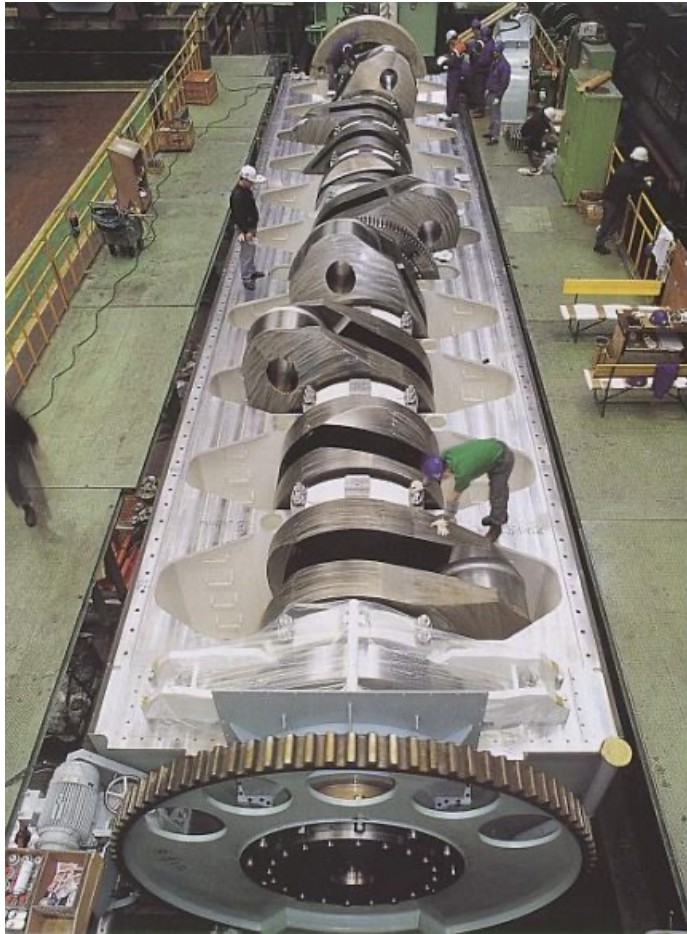


Le moteur diesel original de 1893 (Deutsches Museum, Munich) $\eta_{1897} = 26 \%$

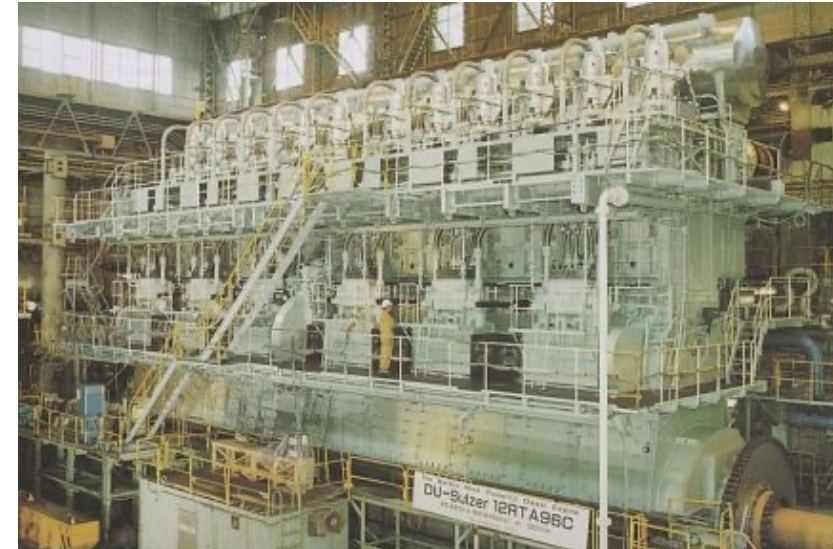
- AN: $\gamma = 1,4$; $\alpha_{1,2} \approx 14$; et $\alpha_{1,3} \approx 9 \Rightarrow \eta_m = 0,62$
- Comparaison avec le rendement maximum :
 $T_3 = 1310 \text{ K}$ et $T_1 = 293 \text{ K}$, $\eta_{\text{Carnot}} = 0,78$

Le plus gros moteur diesel (Wärtsilä - Sulzer 14RTFLEX96 – C, Finlande)

Longueur: 397 m

Le plus gros moteur diesel (Wärtsilä - Sulzer 14RTFLEX96 – C, Finlande)

La cylindrée globale de la version à 14 cylindres est de 25 480 litres ; la puissance est de 108 920 ch (80 MW), le couple le plus grand est de 7,6 millions de N.m.

Le plus gros moteur diesel (Wärtsilä - Sulzer 14RTFLEX96 – C, Finlande)

La consommation moyenne au régime le plus économique est de 6.000 litres/heure de gasoil (avec une efficacité au-delà de 50%).

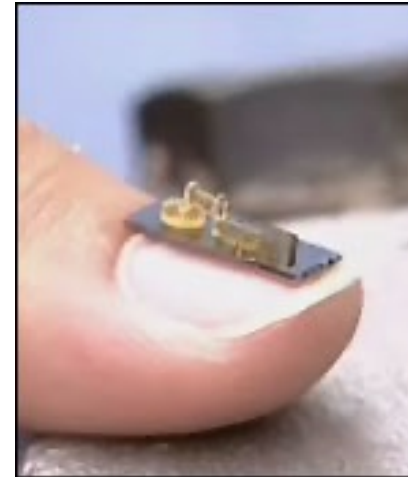
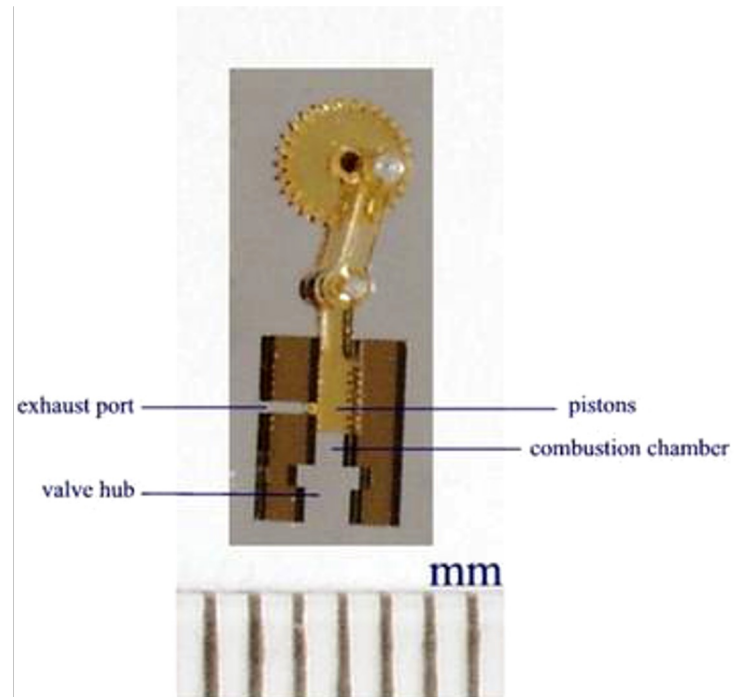
Le plus gros moteur diesel (Wärtsilä - Sulzer 14RTFLEX96 – C, Finlande)

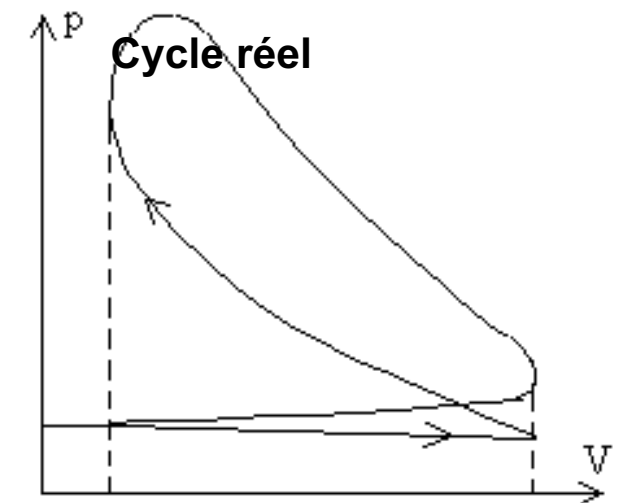
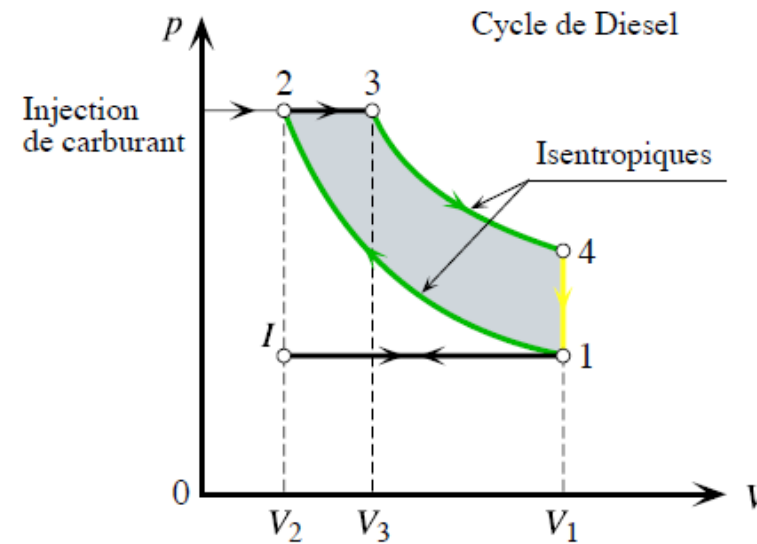
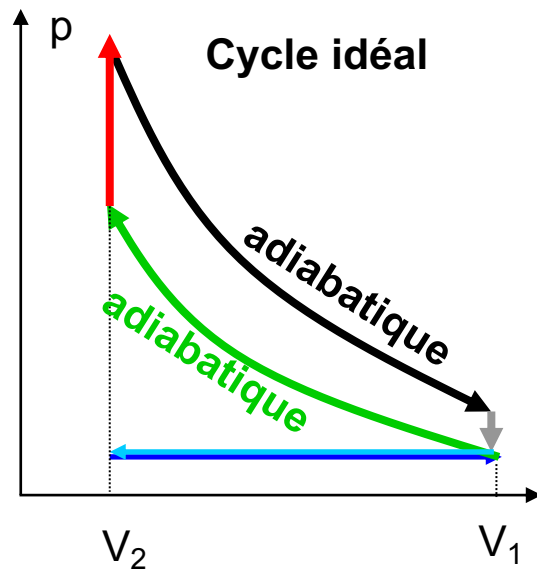
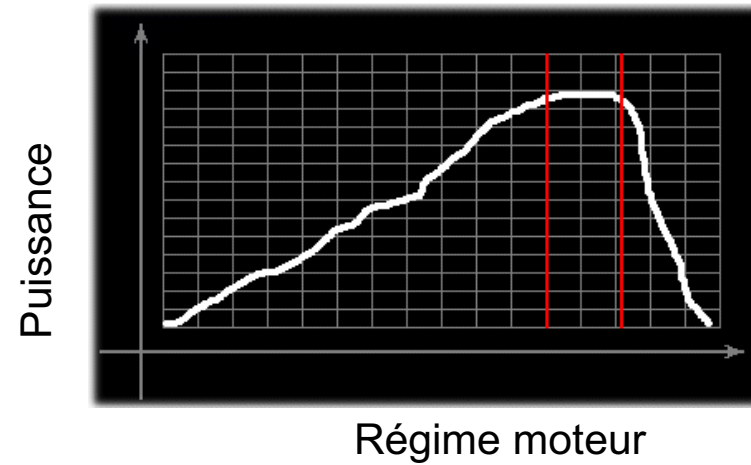


Piston



Micro-moteur



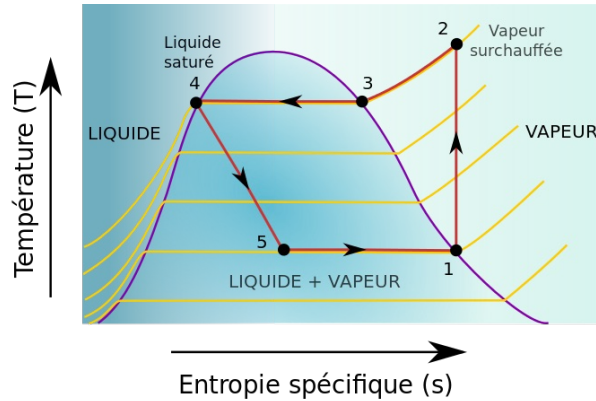


1

Exemples d'applications.

- *Pompe à chaleur*
- *Moteurs*
 - *Moteur d'Otto*
 - *Diesel*
 - ...

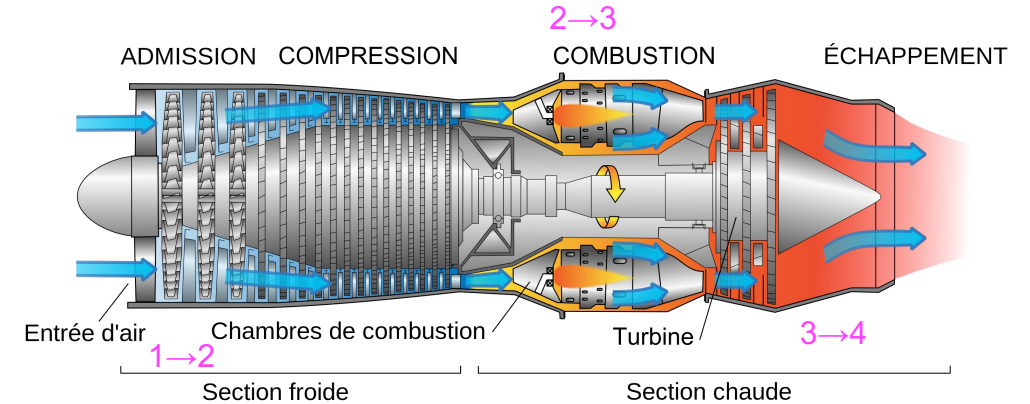
- De nombreux autres cycles ont été envisagés et / ou sont utilisés. Certains très complexes, que l'on n'étudiera pas dans ce cours !



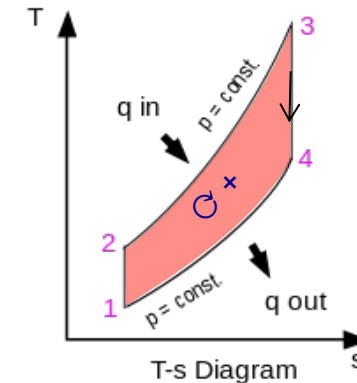
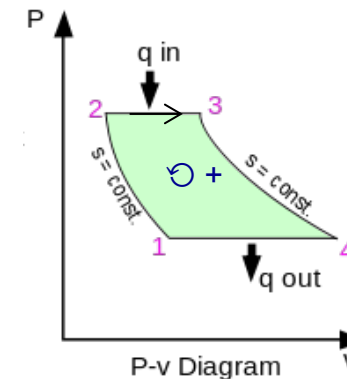
- Cycle de Rankine et cycle de Hirn (machines à vapeur, pompe à chaleur)

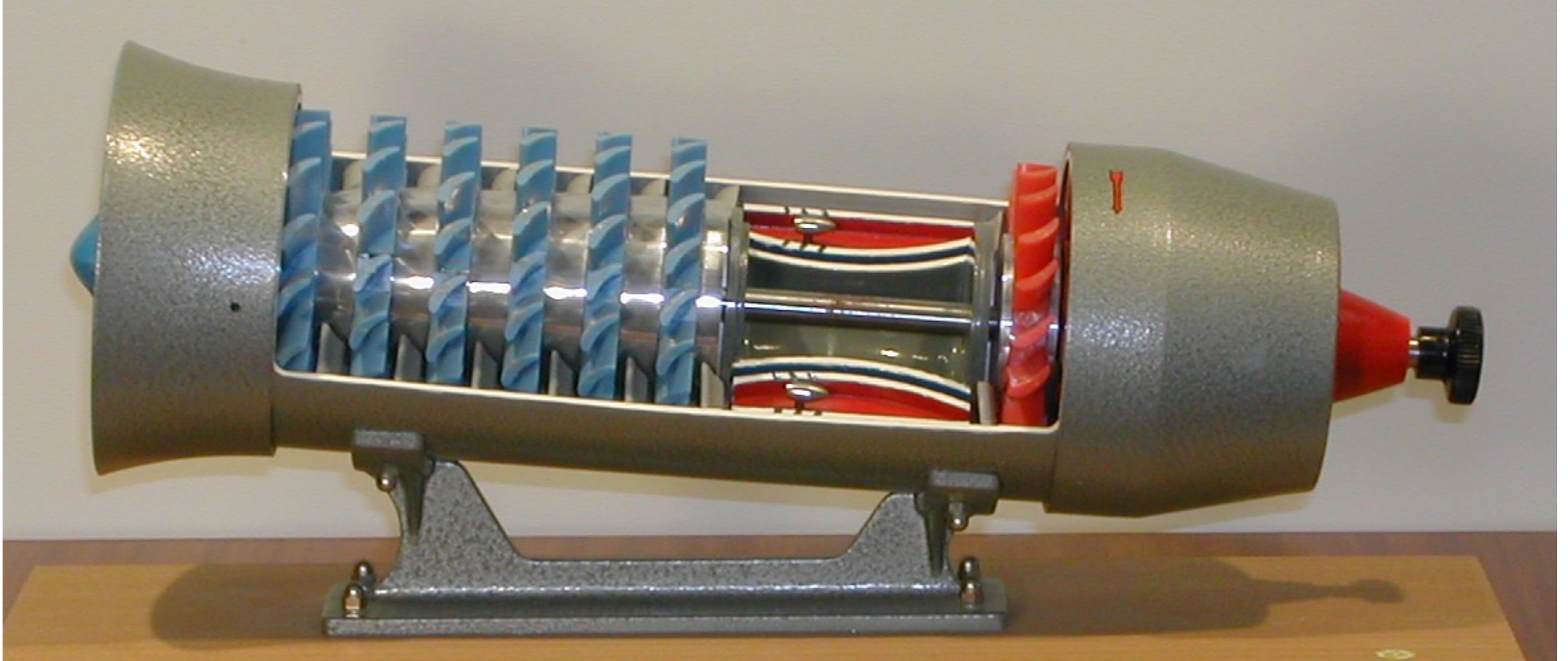
— : isobares
 — : cycle frigorifique
 — : courbe de saturation

- 1 à 2: Compression de la vapeur
- 2 à 3: La vapeur surchauffée est refroidie dans le condenseur
- 3 à 4: La vapeur est liquéfiée dans le condenseur
- 4 à 5: Le liquide s'évapore partiellement à travers la soupape de détente
- 5 à 1: Le mélange liquide-vapeur est totalement vaporisé dans l'évaporateur



- Cycle de Joule ou cycle de Brayton (turbines, centrales thermiques / nucléaires, avions)

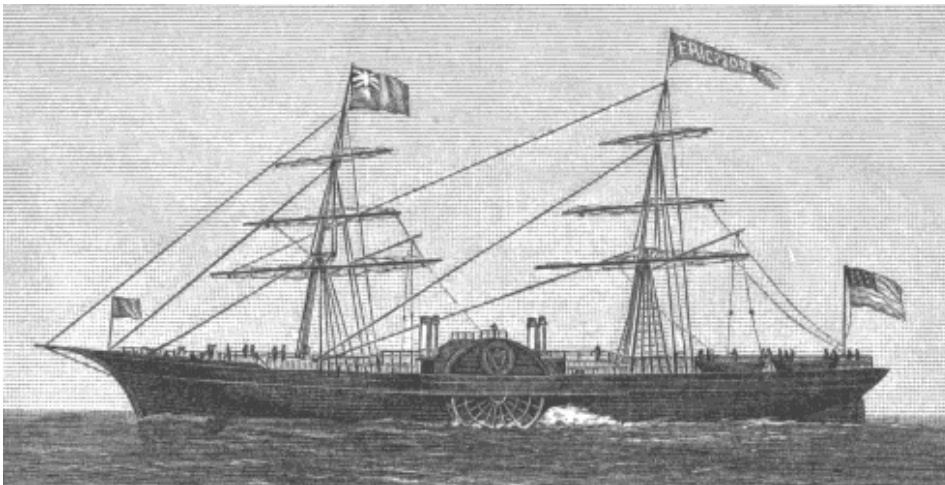
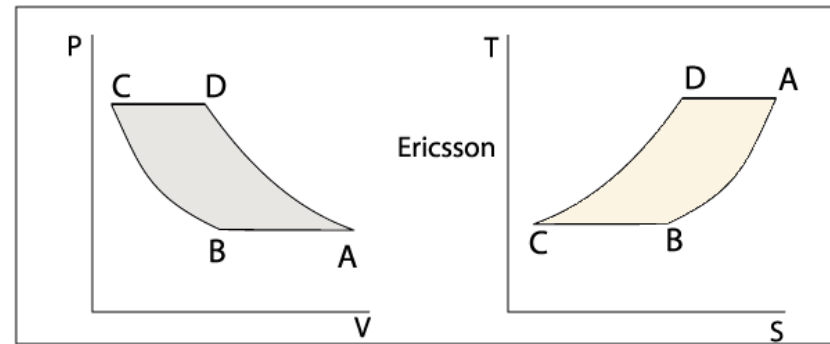




- De nombreux autres cycles ont été envisagés et / ou sont utilisés. Certains très complexes, que l'on n'étudiera pas dans ce cours !



- Cycle d'Ericsson



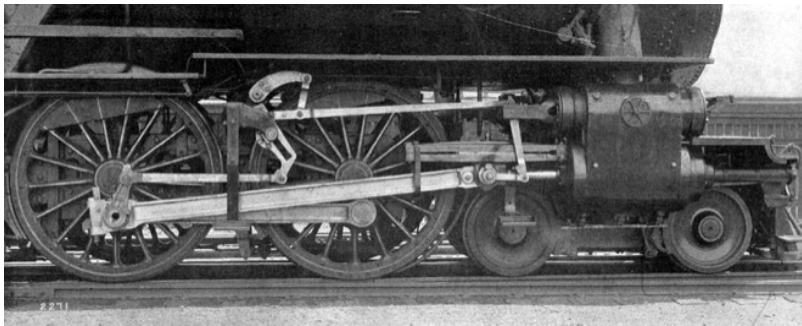
Caloric Ship Ericsson 1851 - 1898

| Cycle | Process 1-2 (Compression) | Process 2-3 (Heat Addition) | Process 3-4 (Expansion) | Process 4-1 (Heat Rejection) | Notes |   |
|---|------------------------------|------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---|---|
| Power cycles normally with external combustion - or heat pump cycles: | | | | | | |
| Bell Coleman | adiabatic | isobaric | adiabatic | isobaric | A reversed Brayton cycle | |
| Carnot | isentropic | isothermal | isentropic | isothermal | Carnot heat engine | |
| Ericsson | isothermal | isobaric | isothermal | isobaric | the second Ericsson cycle from 1853 | |
| Rankine | adiabatic | isobaric | adiabatic | isobaric | Steam engine | |
| Hygroscopic | adiabatic | isobaric | adiabatic | isobaric | Hygroscopic cycle | |
| Scuderi | adiabatic | variable pressure and volume | adiabatic | isochoric | | |
| Stirling | isothermal | isochoric | isothermal | isochoric | Stirling engine | |
| Stoddard | adiabatic | isobaric | adiabatic | isobaric | | |
| Power cycles normally with internal combustion: | | | | | | |
| Brayton | adiabatic | isobaric | adiabatic | isobaric | Jet engines the external combustion version of this cycle is known as first Ericsson cycle from 1833 | |
| Diesel | adiabatic | isobaric | adiabatic | isochoric | Diesel engine | |
| Lenoir | isobaric | isochoric | adiabatic | | Pulse jets (Note: Process 1-2 accomplishes both the heat rejection and the compression) | |
| Otto | adiabatic | isochoric | adiabatic | isochoric | Gasoline / petrol engines | |

- Machines à vapeur

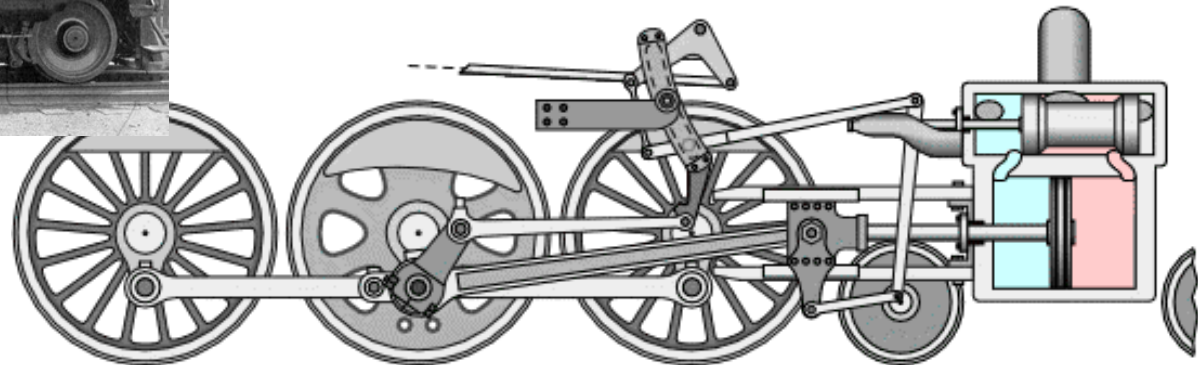


- Éolipyle de Ήρων ὁ Ἀλεξανδρεὺς (Héron d'Alexandrie)



- Distribution Walschaerts

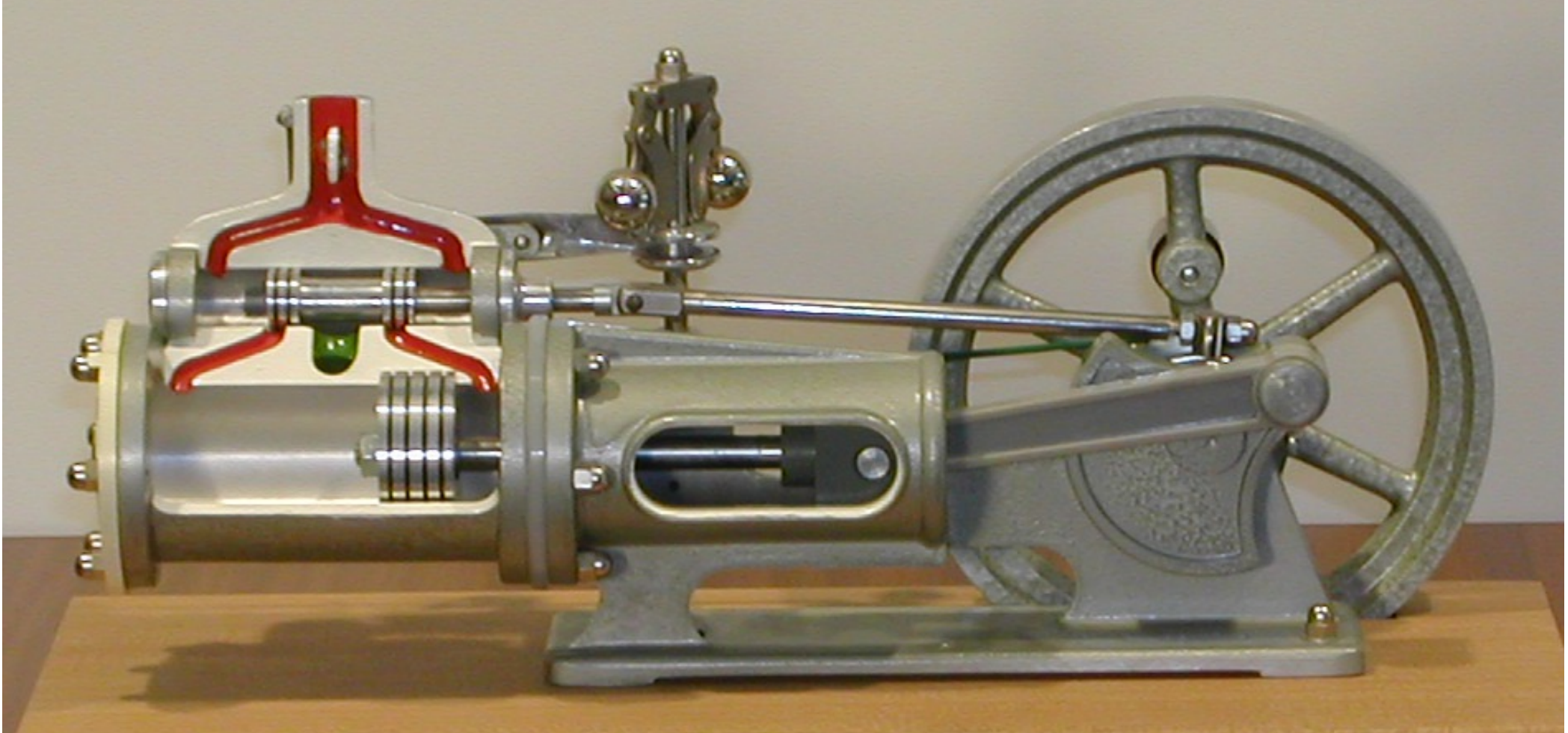
Source : wikipedia



203 km/h en 1938

National Railway Museum, York, UK





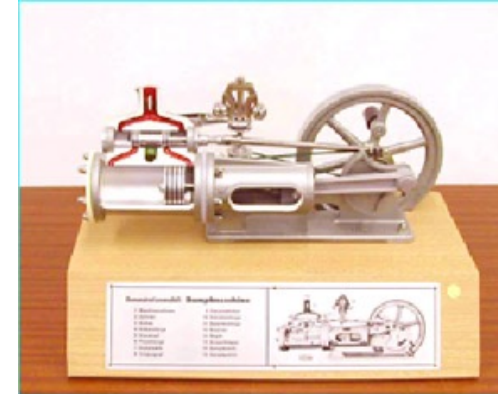
- 1 *Pompe à chaleur*
- 2 *Moteur à explosion à deux et quatre temps
Cycle de Beau de Rochas et moteur d'Otto.*
- 3 *Moteur à allumage par compression et cycle de Diesel.*

Expériences auditoires EPFL : auditoires-physique.epfl.ch

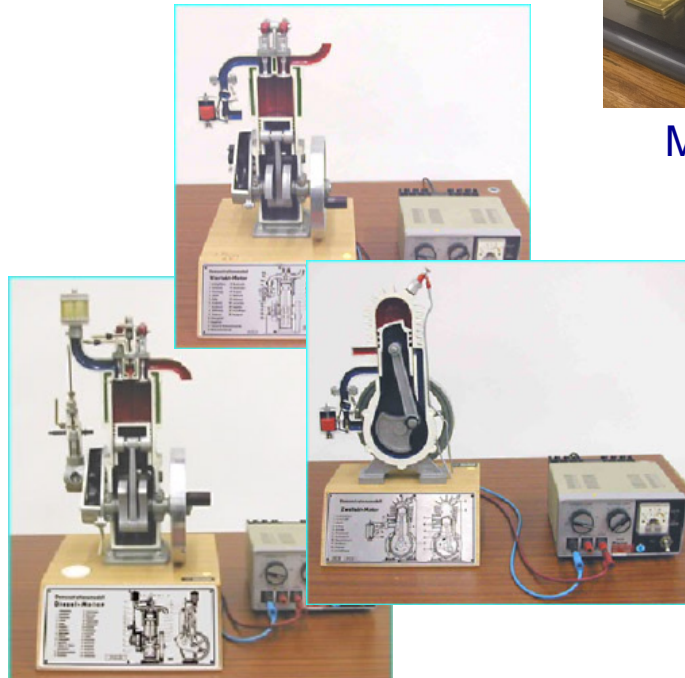
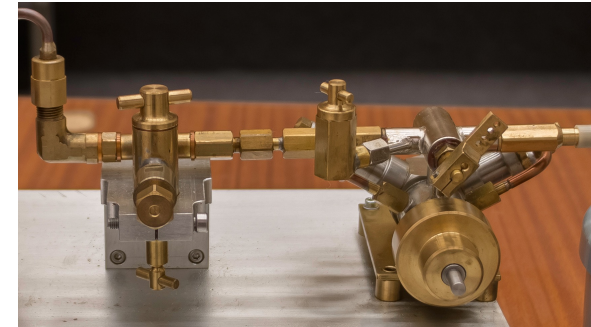
Chaine YouTube : www.youtube.com/channel/UC4htKGfCRRkFylqAo8DGocg



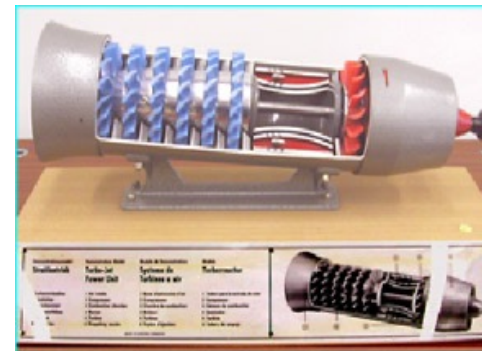
Moteur à dépression



Modèle machine à vapeur



Modèles moteur à explosion et Diesel, deux temps, quatre temps



Modèle turboréacteur



Éolipyle