

THERMODYNAMIQUE

PHYS-106 (b)

7. Cycles et machines
thermiques

Structure du cours

1. Introduction à la thermodynamique
2. Théorie cinétique des gaz
3. Gaz parfaits, gaz réels et gaz de Van der Waals
4. Transitions de phase
5. Le premier principe
6. Le second principe
7. Cycles et machines thermiques
8. Diffusion, transfert de chaleur
9. Systèmes ouverts, potentiel chimique
10. Introduction à la relativité restreinte

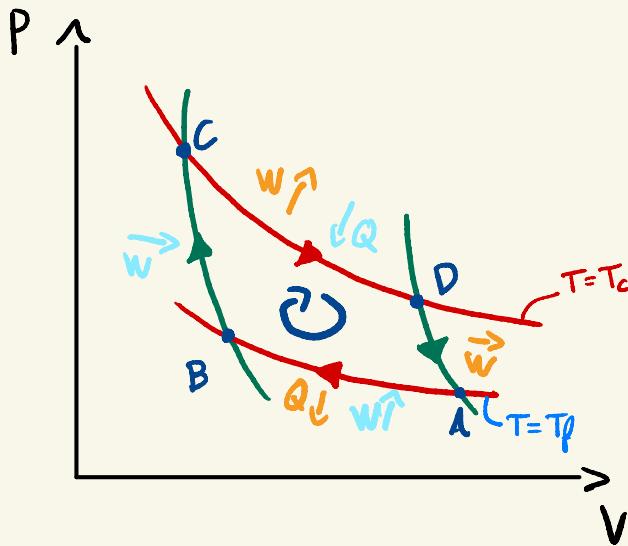
Structure chapitre 7

7. Cycles et machines thermiques

- 7.1. Rappel cycle de Carnot
- 7.2. Cycle de Stirling
- 7.3. Le moteur d' Otto
- 7.4. Le moteur de Diesel
- 7.5. Autres cycles / moteurs

7.1. Rappel : cycle de Carnot

On a vu que le cycle de Carnot est un cycle idéal qui comprend 2 transformations isothermes et 2 transformations adiabatiques.



On a montré que ce cycle a le rendement maximum d'une machine thermique fonctionnant entre 2 réservoir de chaleur à température T_c et T_f :

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

En pratique, il n'existe pas de machines thermiques basées sur le cycle de Carnot, les autres cycles sont plus facilement réalisables.

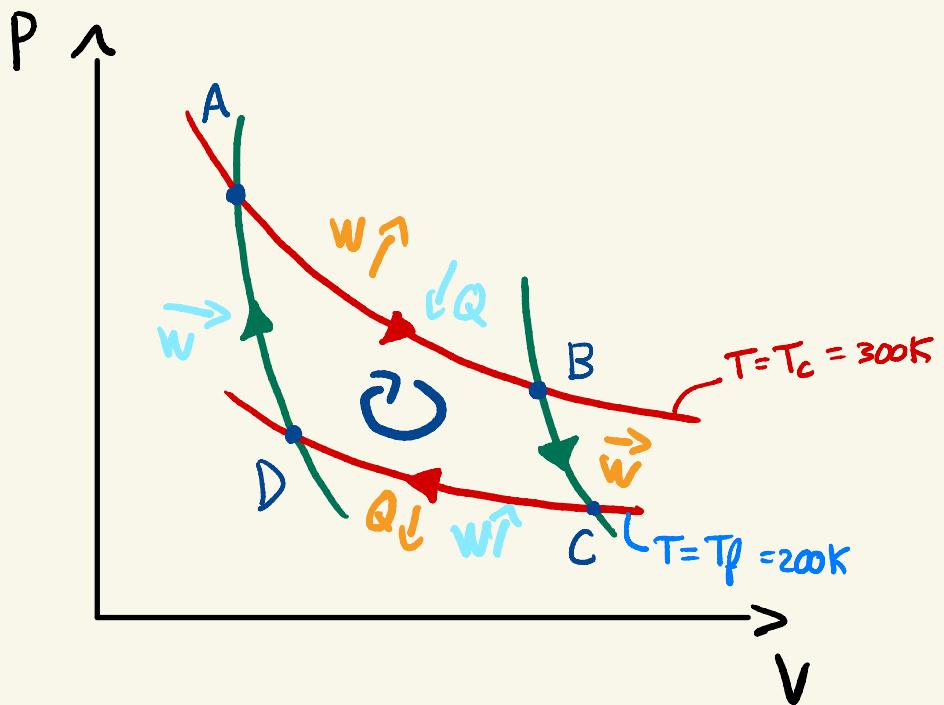
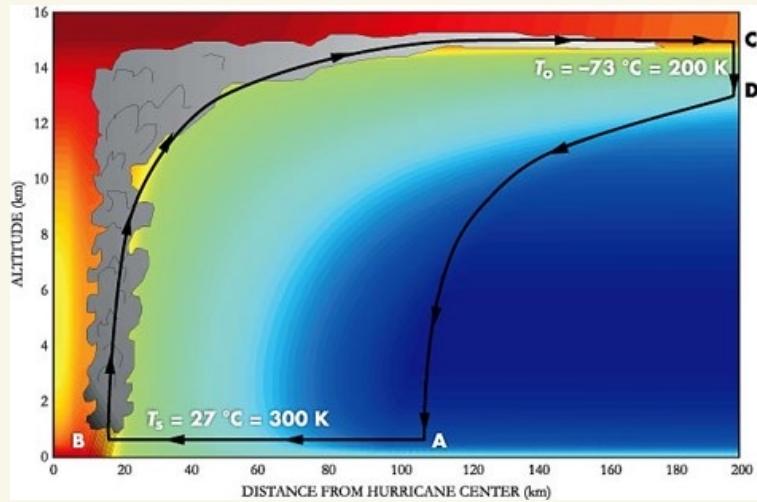
On peut cependant observer dans la nature des phénomènes naturels qui se rapprochent du fonctionnement d'un cycle de Carnot, comme les courants atmosphériques ou marins (Gulf-Stream), les ouragans, ...

Ouragans (ou cyclones, typhons)

La mécanique explique la forme des ouragans (accélération de Coriolis).

La thermodynamique explique la dynamique des ouragans.

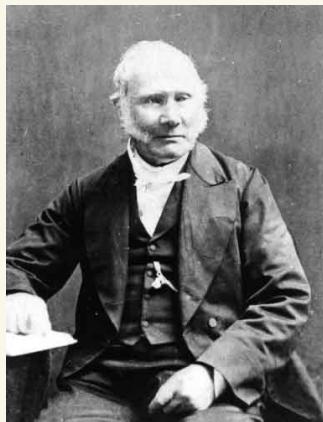




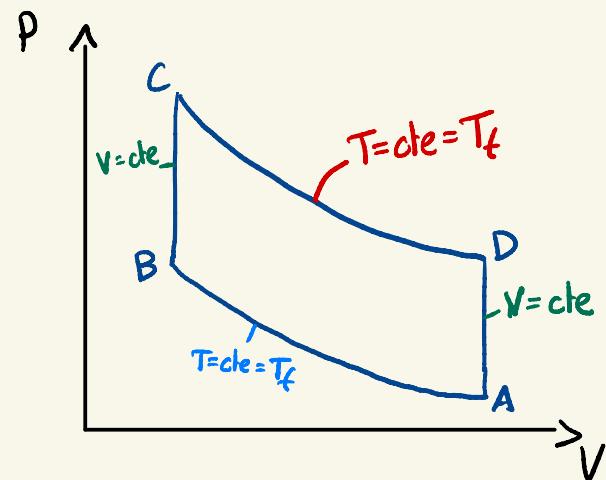
- La description de l'ouragan est bien approximée par un cycle de Carnot. Il y a tout de même quelques différences :
 - le travail W est dissipé sous forme de vents turbulents
 - une partie de l'énergie est dissipée sous forme de changement d'état (condensation, pluie)
- Ordre de grandeur de la puissance générée par un ouragan : $P \sim 100 \text{ GW} !$

7.2. Le cycle de Stirling

Le cycle de Stirling est composé de 2 transformations isothermes et de 2 transformations isochores.



Robert Stirling (1790-1878)



Bilan des échanges énergétiques pour ce cycle en considérant un gaz parfait :

A \rightarrow B: isotherme : $T = T_f = \text{cte}$

$$\Delta U = W + Q = 0$$

$$W = \int_A^B -p \, dV = nRT_f \int_{V_B}^{V_A} \frac{1}{V} \, dV = nRT_f \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) > 0$$

$$Q = -nRT_f \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) < 0$$

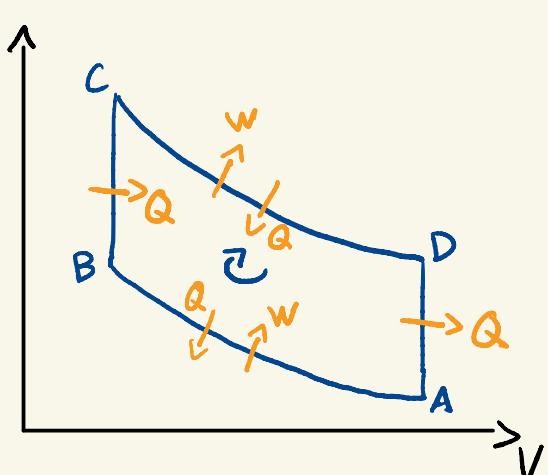
C-D: $T = T_c = \text{cte}$

$$\Delta U = W + Q = 0$$

$$W_{C-D} = \int_C^D -pdV = nRT_c \int_D^C \frac{dV}{V}$$

$$W_{C-D} = nRT_c \ln\left(\frac{V_c}{V_D}\right) < 0$$

$$Q_{C-D} = -nRT_c \ln\left(\frac{V_c}{V_D}\right) > 0$$



B-C: $V_B = V_C = \text{cte}$

$$\Delta U = \underbrace{W}_{=0} + Q = \frac{f}{2} n R \Delta T$$

$$Q_{B-C} = \frac{f}{2} n R (T_c - T_f) > 0$$

$$\underline{D-A}: Q_{D-A} = \frac{f}{2} n R (T_f - T_c) < 0$$

Bilan: $W_{\text{cycle}} = nRT_f \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) + nRT_c \ln\left(\frac{V_c}{V_D}\right)$

$$\text{et } \frac{V_c}{V_D} = \frac{V_B}{V_A}$$

$$\Rightarrow W_{\text{cycle}} = -nR(T_c - T_f) \ln\left(\frac{V_D}{V_c}\right)$$

$$\text{Bilan pour } Q_{\text{regue}} = -nRT_c \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right) + \frac{t}{2} nR (T_c - T_f)$$

\uparrow
 > 0

- Le rendement est donc :

$$\eta = \frac{-W}{Q_{\text{regue}}} = \frac{nR(T_c - T_f) \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)}{\frac{t}{2} nR(T_c - T_f) + nRT_c \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)}$$

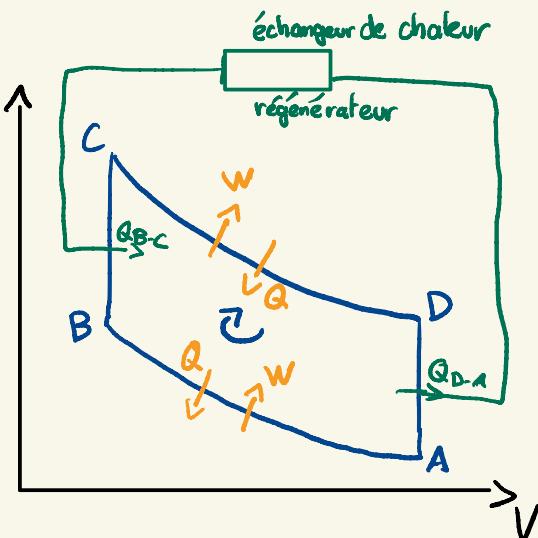
- On a vu que $Q_{D-A} = -Q_{B-C}$

Si on est capable de recycler la chaleur entre D-A et B-C,

$$Q_{\text{regue}} = Q_{C-D} = -nRT_c \ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)$$

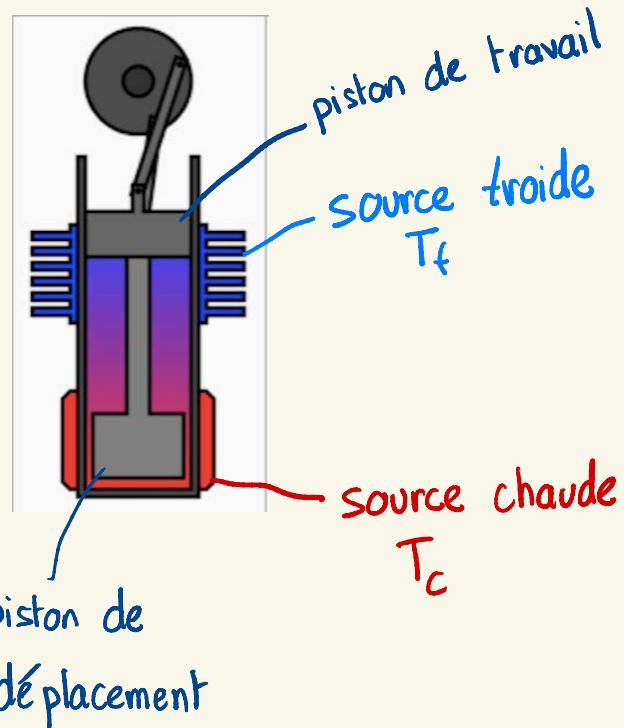
$$\Rightarrow \eta = \frac{-W}{Q_{\text{regue}}} = \frac{nR(T_c - T_f) \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)}{nRT_c \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)}$$

$$\Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}} = \eta_{\text{Carnot}}$$



Exemple de réalisation pratique

- Utilisation d'un cylindre et deux sources de chaleur chaudes et froides séparées
- Utilisation de deux pistons :
 - un piston de travail, hermétique, qui définit le volume
 - un piston de déplacement, qui déplace le gaz de la source froide à la source chaude et inversement



C

Détente isotherme :

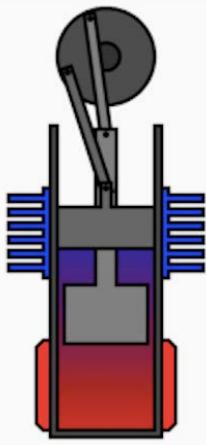
$$Q > 0$$

$$W < 0$$

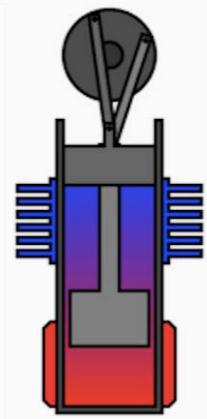
$$P \downarrow$$

$$V \uparrow$$

T cte



D



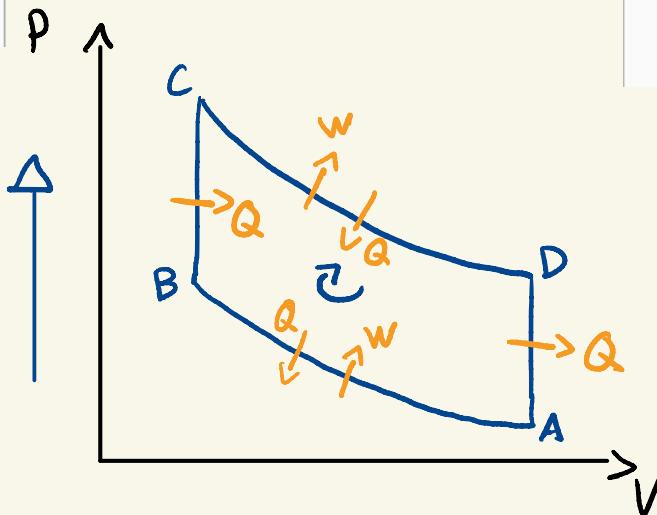
Chaudrage isochore

$$Q > 0$$

$$P \uparrow$$

 $V \text{ cte}$

$$T \uparrow$$



Refroidissement isochore

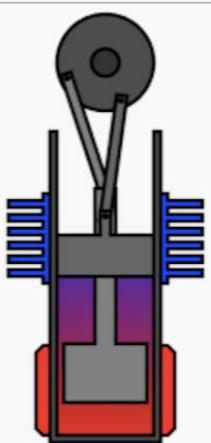
$$Q < 0$$

$$P \uparrow$$

$$V \text{ cte}$$

$$T \downarrow$$

B



A

Compression isotherme

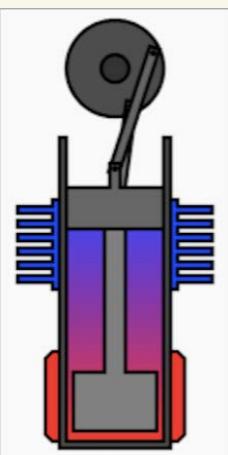
$$Q < 0$$

$$W > 0$$

$$P \uparrow$$

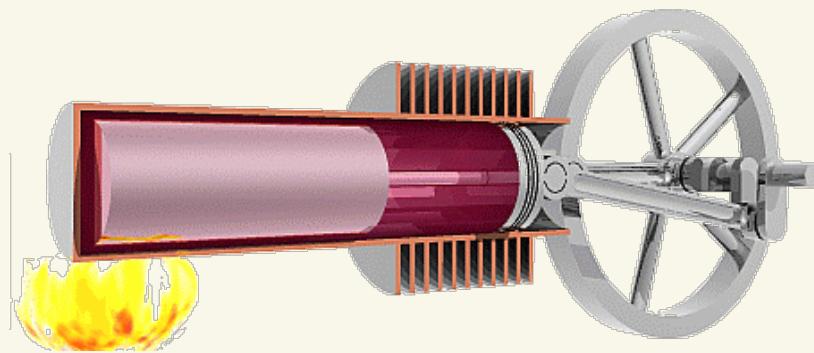
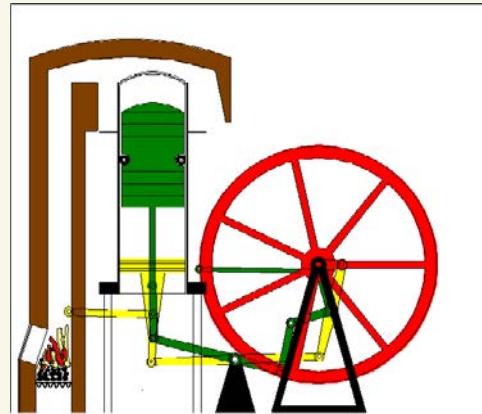
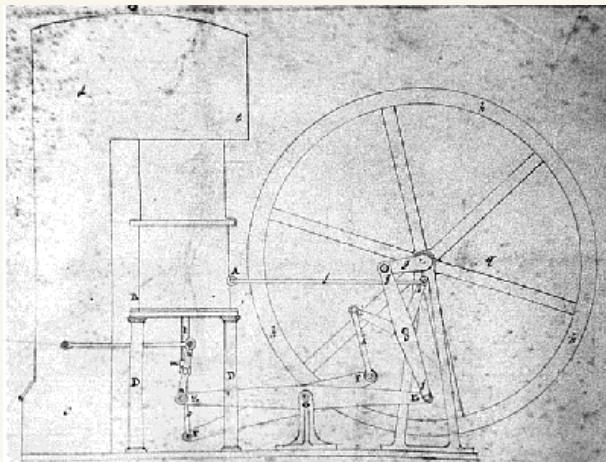
$$V \downarrow$$

T cte

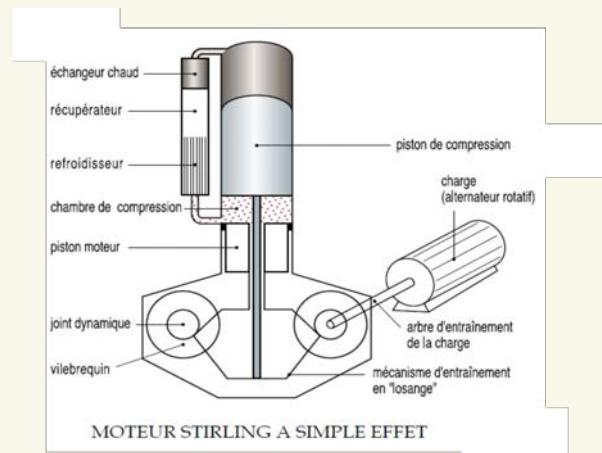
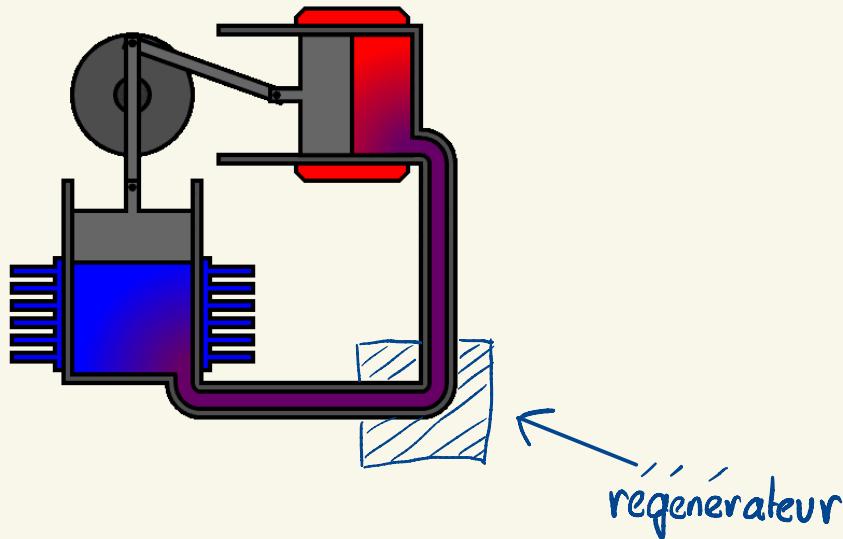


Exemples de moteurs de Stirling :

Brevet de Stirling (1816)



Exemples avec régénérateur



Avantages / désavantages du moteur de Stirling

Avantages:

- Le moteur de Stirling est basé sur un circuit d'un gaz fermé en utilisation des sources de chaleur externes (pas de combustion interne).
 - => - pas de pollution du gaz du à la combustion
 - possibilité d'utiliser différentes sources de chaleur (combustion externe, énergie solaire,...)
 - silencieux (pas de détonation)
 - peu de vibrations => moins de contraintes mécaniques
- $\eta_{réel} \sim 40\%$ (moteurs à explosion $\eta_{réel} \sim 35\%$)
- inversible: possibilité de les faire fonctionner comme frigo ou pompe à chaleur.

Inconvénients :

- Assez difficile à réaliser :
 - étanchéité des pistons
 - transfert thermiques difficile à optimiser (les échanges thermiques sont lents)
- Difficile à commander :
 - difficile à varier le taux de régime du moteur
 - difficile de varier la puissance ou le couple, ce qui est nécessaire pour une application de transport.
- Cher car relativement peu d'applications contrairement aux moteurs à combustion interne.

Exemples d'applications :

- Production d'électricité à partir de l'énergie solaire :

Dish-Stirling

- parabole pour focaliser le rayonnement solaire
- le moteur Stirling au foyer



"Dish-Stirling" à Font-Romeu-Odeillo

- Propulsion de sous-marin

- fluide : oxygène liquide
- furtif car silencieux et peu de vibrations

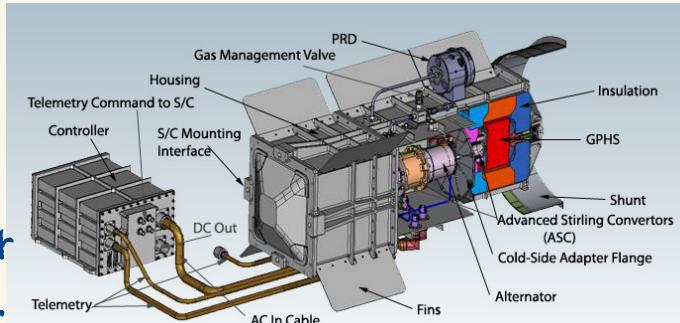


sous-marin classe Gotland (SWE)

- Génération d'électricité sur des satellites (projet NASA, DOE)

- source de chaleur :
un radio-isotope
(ex : Plutonium-238)

se désintègre naturellement
et génère de la chaleur.



Advanced Stirling Radioisotope
Generator (ASRG)

- Cryogénie : refroidissement d'équipements scientifiques, médicaux ou industriels

- basés sur le cycle
de Stirling inversé

- capable de refroidir
le gaz à 18 K.



Générateur d'Oxygène ou Azote liquide
ENTECA

7.3. Le moteur d' Otto

- Nicolaus Otto a développé en 1876 le premier moteur à combustion interne à 4 temps. C'est le premier moteur à explosion efficace => révolutionne l'industrie automobile



Nicolaus Otto (1832-1891)

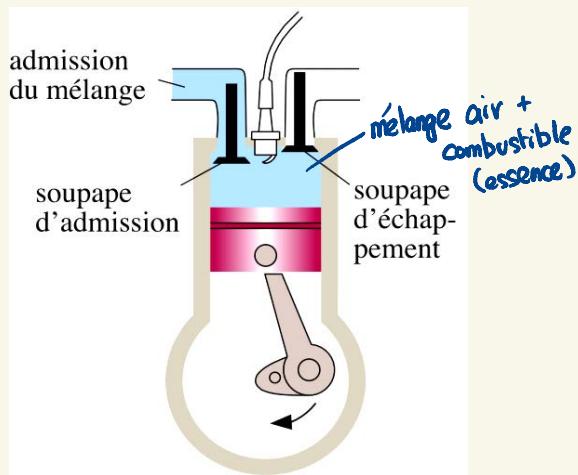
- Son fils Gustav Otto fonde BMW en 1913
- Le moteur est basé sur le cycle à 4 temps théorisé par Alphonse Beau de Rochas.

Pour modéliser ce cycle, on va supposer :

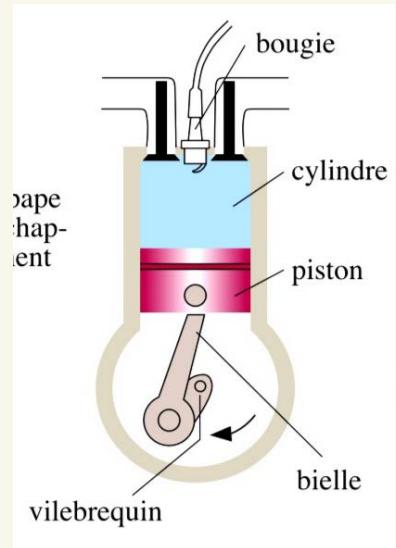
- le gaz (air) est un gaz parfait
- les transformations sont réversibles

Le moteur est appelé "4 temps", bien qu'il y ait en réalité 5 transformations.

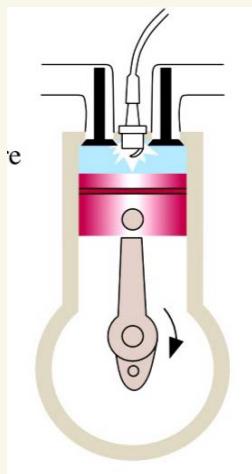
Admission



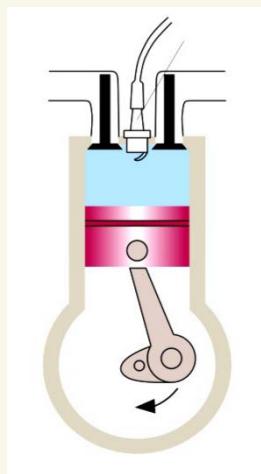
Compression



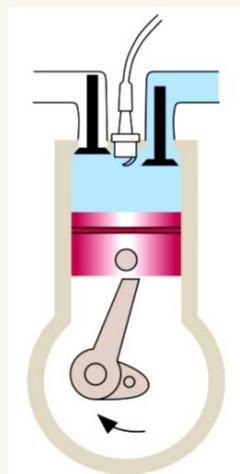
Allumage (ignition)



Détente

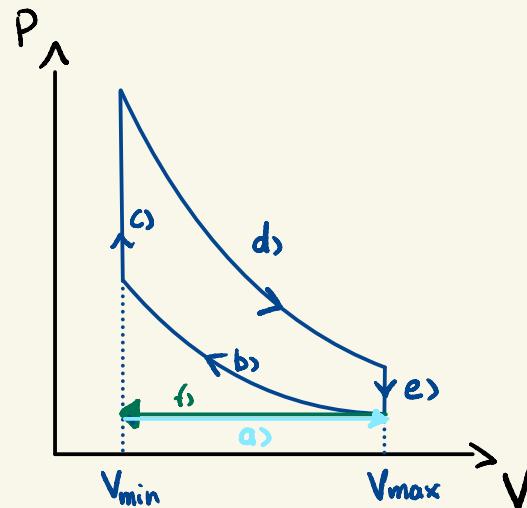
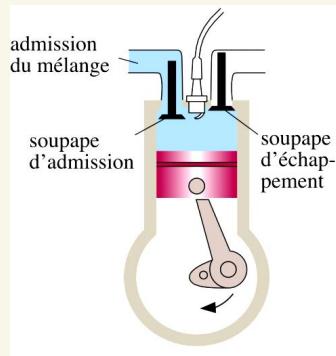


Echappement

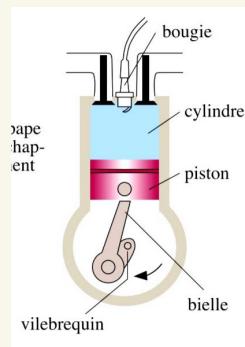


Le moteur est appelé "4 temps", bien qu'il y ait en réalité 5 transformations.

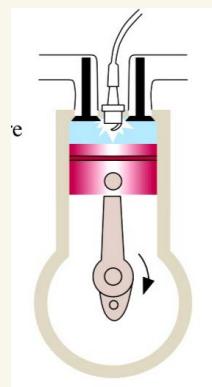
a) Admission $P = \text{cte}$ $V \uparrow$



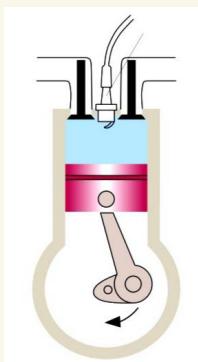
b) Compression adiabatique $P \uparrow$ $V \downarrow$



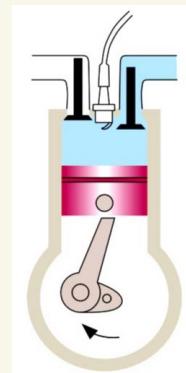
c) Allumage (lignition) compression isochore $P \uparrow$ $V \text{cte}$ $Q_c > 0$



d) Défense adiabatique $P \uparrow$ $V \uparrow$ $W < 0$



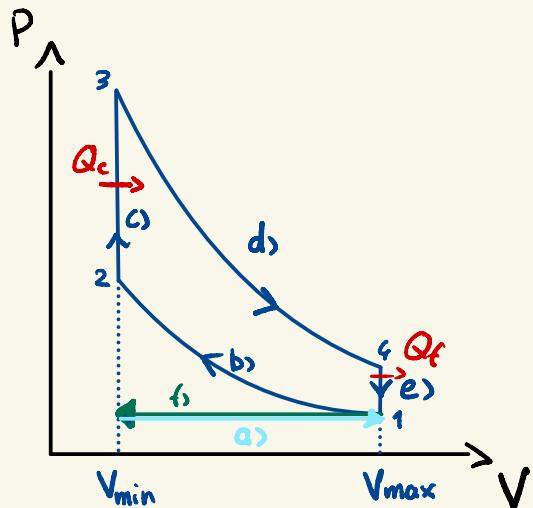
e) Echappement P_b V_a $Q_e < 0$ ensuite P_d V_b



Calcul du rendement

a) et f) s'annulent

Les transferts de chaleur
se font lors de l'allumage c)
et de l'échappement .



c) Compression isochore

$$dU = SQ + \underbrace{SW}_{-pdV = 0} = SQ$$

$$Q_c = \Delta U = nC_{Vm}(T_3 - T_2)$$

e) Détente isochore

$$Q_f = \Delta U = nC_{Vm}(T_1 - T_4)$$

Le rendement du cycle est donné par:

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

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

b) et d) Transformations adiabatiques

$$TV^{\gamma-1} = \text{cte} \quad V_1 = V_4 \quad \text{et} \quad V_2 = V_3$$

$$\Rightarrow \begin{cases} T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} & \textcircled{1} \\ T_4 V_1^{\gamma-1} = T_3 V_2^{\gamma-1} & \textcircled{2} \end{cases}$$

$$\textcircled{1} - \textcircled{2} \quad (T_1 - T_4) V_1^{\gamma-1} = (T_2 - T_3) V_2^{\gamma-1}$$

$$\Rightarrow \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_4} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} \right)^{\gamma-1} = \alpha^{\gamma-1}$$

α est le taux de compression

$$\alpha = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} > 1$$

Le rendement s'écrit en fonction du taux de compression:

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

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

Exemple : $\alpha = 10$ (moteur récent)

$\gamma = 1.4$ (pour N_2, O_2)

$$\Rightarrow \boxed{\eta_{\text{Otto}} \sim 60\%}$$

Typiquement, les températures mises en jeu dans un moteur d'Otto sont :

$$T_3 = 1220 \text{ K} \quad \text{et} \quad T_1 = 293 \text{ K} \quad \overset{\sim 20^\circ \text{C}}{/}$$

- Le rendement maximale que permettrait une machine de Carnot :

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

$$\boxed{\eta_{\text{Carnot}} \sim 76\%}$$

- Dans la pratique $\eta_{\text{Otto}} \sim 25-35\%$ en raison de pertes thermiques, de pertes par frottements, de pertes dues au pompage et de combustion incomplète et irrégularités du mélange.

En raison de ces pertes, le cycle est irréversible.

- Améliorations possibles du rendement :
 - réductions des multiples pertes
 - augmentation du taux de compression α :
- Indice d'octane :

Avec un taux de compression trop élevé, on a un phénomène d'**auto-allumage** (inflammation spontanée et accidentelle du mélange carburé). On atteind plus le taux de compression désiré.

Pour éviter l'auto-allumage, on ajoute des substances comme le tétraéthyl de Plomb dans le passé ou de l'éthanol et d'autres additifs.

La résistance à l'auto-allumage se mesure avec
l'indice d'octane :

- indice d'octane 100 : iso-octane C_8H_{18} , très résistant à l'auto-allumage
- indice d'octane 0 : n-heptane C_7H_{16} , qui s'enflamme très facilement sous compression

Exemples de carburant :

Indice d'octane

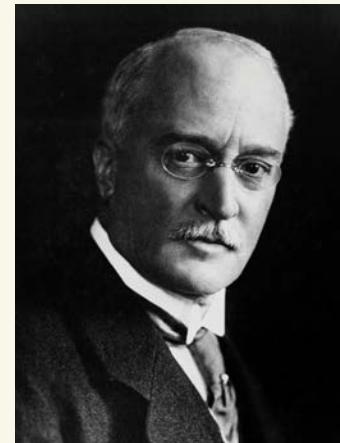
Essence ordinaire : 95

Essence premium : 98

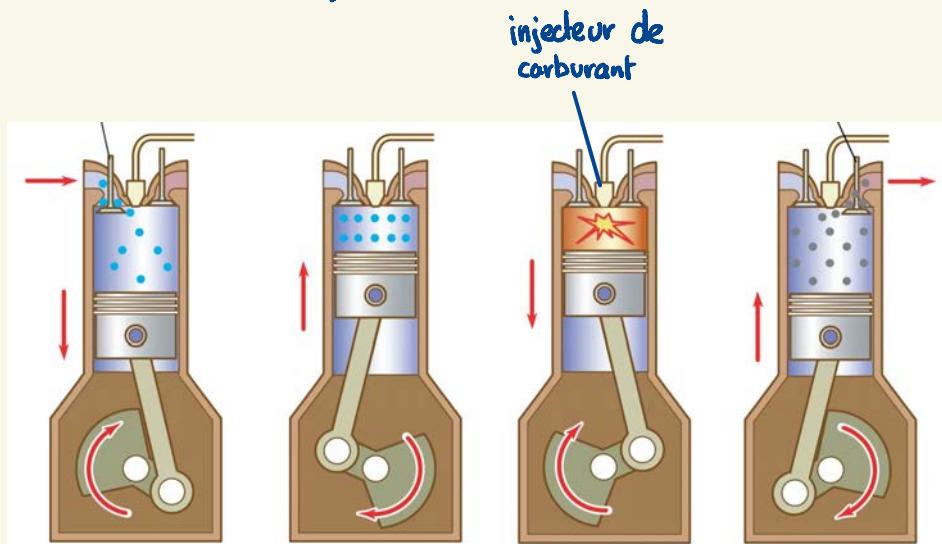
Carburant de course : >100

7.4. Le moteur de Diesel

- inventeur du moteur de Diesel à combustion interne
- différence principale avec le moteur d'Otto: admission d'air uniquement => permet d'atteindre un taux de compression plus élevé ($\alpha > 20$) .



Rudolf Diesel (1858-1913)



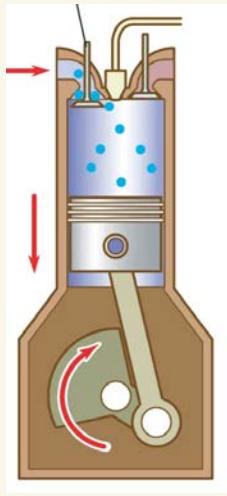
Admission
air uniquement

Compression

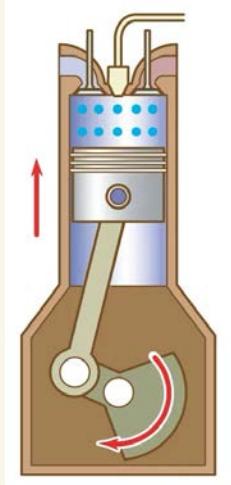
Ignition
spontanée
+
Détente

Echappement

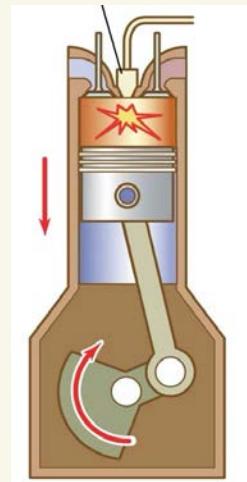
a) Admission
 $p = \text{cte}$ $V \uparrow$



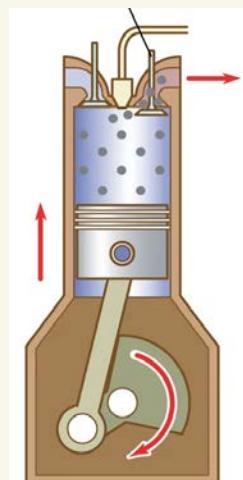
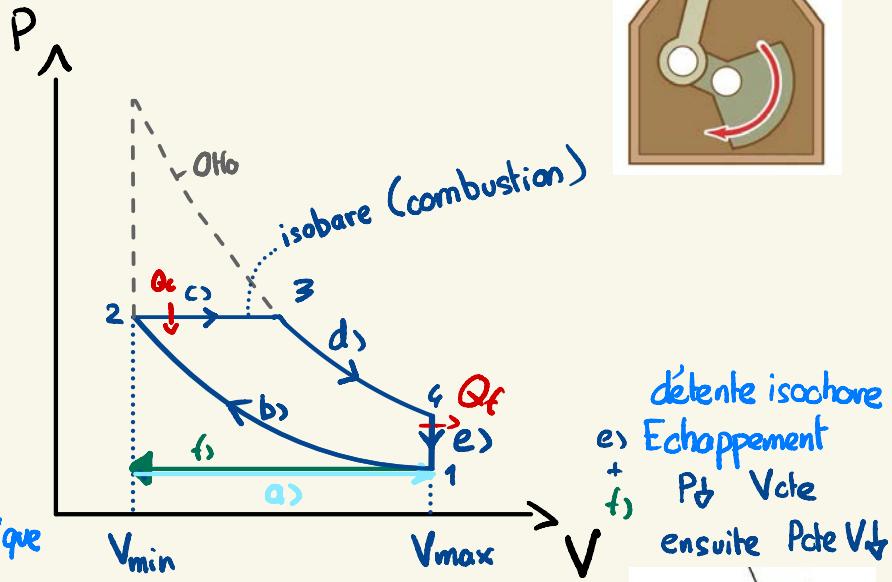
b) Compression adiabatique
 $p \uparrow$ $V \downarrow$ $W > 0$



c) Ignition + Détente $W < 0$ $Q_c > 0$
d) isobare + adiabatique
 $p = \text{cte}$ et b $V \uparrow$



détonation isochore
e) Echappement
 $P_f \downarrow$ V_{c}
ensuite $p = \text{cte}$ $V \uparrow$



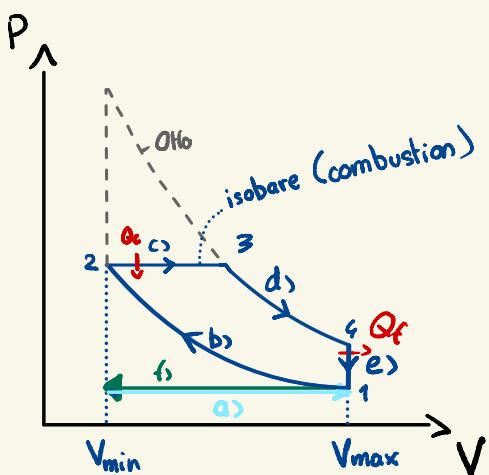
Calcul du rendement:

a) et f) s'annulent

Les transferts de chaleur

Se font lors de l'ignition
et de l'échappement.

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



c) détente isobare ($V \uparrow$)

$$Q_c = C_p \Delta T = C_p (T_3 - T_2) > 0$$

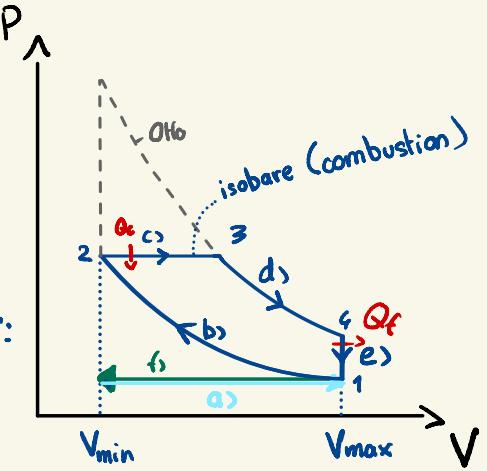
e) détente isochore ($P \downarrow$)

$$Q_f = C_v \Delta T = C_v (T_1 - T_4) < 0$$

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

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

On utilise à nouveau les transformations adiabatiques pour exprimer le rendement en fonction des variations de volumes:



$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

$$T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_4^{\gamma-1} \quad \text{avec } V_2 = V_{\min}$$

et $V_1 = V_4 = V_{\max}$

$$\Rightarrow T_1 = T_2 V_{\min}^{\gamma-1} V_{\max}^{1-\gamma}$$

$$T_4 = T_3 V_3^{\gamma-1} V_{\max}^{1-\gamma}$$

$$\begin{aligned} \text{On écrit } \frac{(T_1 - T_4)}{(T_3 - T_2)} &= \frac{(T_2 V_{\min}^{\gamma-1} V_{\max}^{1-\gamma} - T_3 V_3^{\gamma-1} V_{\max}^{1-\gamma})}{(T_3 - T_2)} \\ &= \frac{T_2 (V_{\min}^{\gamma-1} - T_3/T_2 V_3^{\gamma-1})}{T_2 V_{\max}^{\gamma-1} (T_3/T_2 - 1)} \end{aligned}$$

$$\text{De c: } P_2 = \frac{nRT_2}{V_{\min}} = \frac{nRT_3}{V_3} = P_3$$

$$\frac{T_2}{V_{\min}} = \frac{T_3}{V_3}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_{\min}}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{(T_1 - T_4)}{(T_3 - T_2)} &= \frac{\left(V_{\min}^{\delta-1} - V_3 V_{\min}^{-1} V_3^{\delta-1} \right)}{V_{\max}^{\delta-1} (V_3 V_{\min}^{-1} - 1)} \\
 &= \frac{V_{\min}^{-1} (V_{\min}^\delta - V_3^\delta)}{V_{\min}^{-1} V_{\max}^{\delta-1} (V_3 - V_{\min})} \\
 &= \frac{\left(\frac{V_{\min}}{V_{\max}} \right)^\delta - \left(\frac{V_3}{V_{\max}} \right)^\delta}{\left(\frac{V_3}{V_{\max}} \right) - \left(\frac{V_{\min}}{V_{\max}} \right)}
 \end{aligned}$$

On préfère exprimer en fonction du taux de

compression $\alpha = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$ et $\alpha_3 = \frac{V_{\max}}{V_3}$

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow \frac{(T_1 - T_4)}{(T_3 - T_2)} &= \frac{\left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} \right)^{-\delta} - \left(\frac{V_{\max}}{V_3} \right)^{-\delta}}{\left(\frac{V_{\max}}{V_3} \right)^{-1} - \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} \right)^{-1}} \\
 &= \frac{\alpha^{-\delta} - \alpha_3^{-\delta}}{\alpha_3^{-1} - \alpha^{-1}}
 \end{aligned}$$

Le rendement est :

$$2 = 1 + \frac{\alpha^{-\delta} - \alpha_3^{-\delta}}{\delta(\alpha_3^{-1} - \alpha^{-1})}$$

Exemple : $\alpha = 14$ et $\alpha_3 = 9$
 $\gamma = 1.4$ (pour N_2, O_2)

$$\Rightarrow \eta \approx 62\%$$

Typiquement, les températures mises en jeu dans un moteur Diesel sont :

$$T_3 = 1310 \text{ K} \quad \text{et} \quad T_1 = 293 \text{ K}$$

$\sim 20^\circ C$

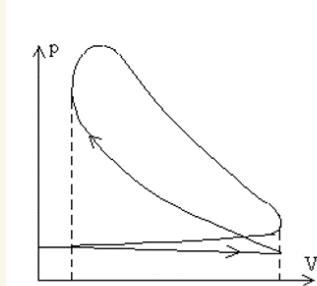
- Le rendement maximale que permettrait une machine de Carnot :

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} \sim 78\%$$

Les meilleurs moteurs actuels (série pour l'automobile) ont un rendement $\sim 36\%$.

Tout comme le moteur d'Otto, il y a de nombreuses pertes durant le cycle moteur.



Cycle Diesel
réel

- L'ignition se fait par auto-ignition. Il n'y a pas besoin de rajouter des additifs pour éviter l'auto-allumage comme pour le moteur d'Otto. Du carburant de moins bonne qualité et plus lourds peut être utilisé.
- Le moteur diesel a plusieurs désavantages par rapport au moteur à essence (Otto) :
 - il est plus lourd (du entre autre à la plus grande compression et une température de fonctionnement plus élevée \rightarrow structure renforcée \rightarrow alliages plus denses et plus robustes)
 - du à un phénomène de combustion incomplète et à la nature du carburant, des composés polluants sont rejettés par le moteur :
 - * oxydes d'Azote (NO_x). (effets sur la santé humaine et la couche d'Ozone).
 - * particules fines
 - * hydrocarbures imbrûlés (HC)

7.5. Autres cycles / moteurs

7.5.1. Cycle Brayton / Joule

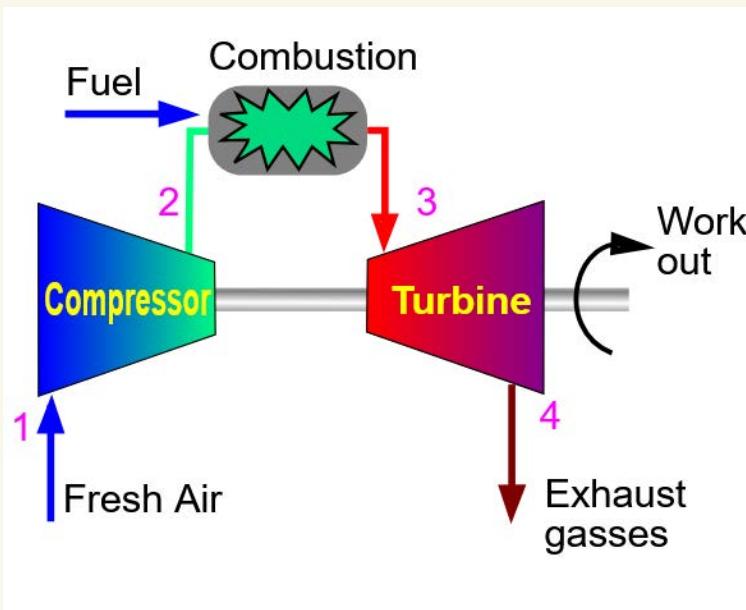
Le cycle de Brayton ou cycle de Joule a été inventé en 1791 par John Barber et développé par George Brayton en 1872.

Ce cycle est utilisé dans:

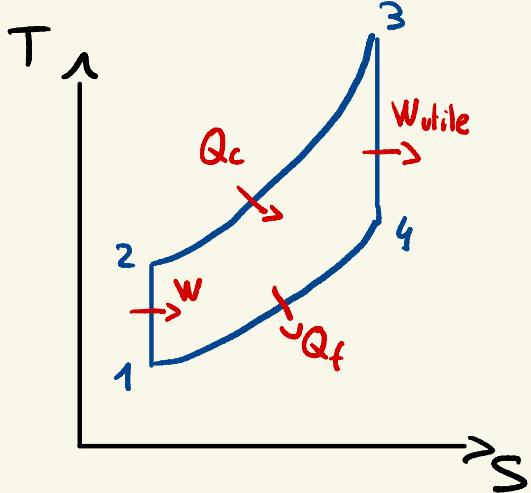
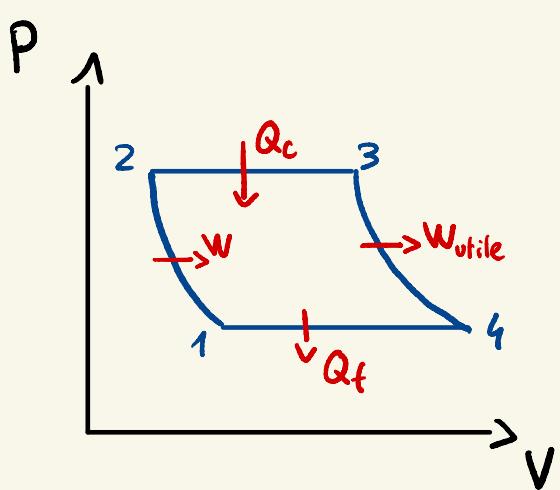
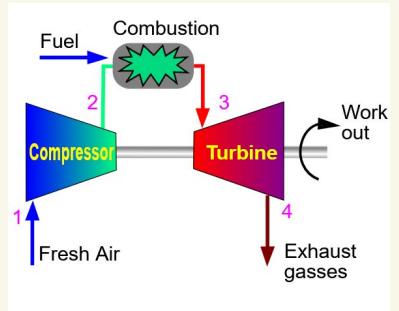
- les turbines à gaz pour la production d'électricité:
 - * centrales électriques (gaz naturel)
 - * groupes électrogènes
- les moteurs à réaction:
 - * turbo réacteurs
 - * turbo propulseurs
 - * turbo soufflante (turbofan)
 - * statoréacteur
 - * moteur fusée

Un moteur basé sur le cycle de Brayton est composé de trois éléments :

- un compresseur, comprimant le gaz
- une chambre à combustion, où s'effectue le mélange avec le carburant et la combustion
- la turbine, où s'effectue la détente du gaz et où est généré le travail utile.



Le cycle idéal est réversible.



1-2 : compression isentropique (\Rightarrow adiabatique)

2-3 : combustion isobare

3-4 : détente isentropique (\Rightarrow adiabatique) $W_{\text{utile}} < 0$

4-1 : échappement isobare

- Le rendement idéal, pour un moteur basé sur le cycle de Brayton est $\eta_{\text{Brayton, idéal}} = 80\%$ (avec $T_f = 300\text{ K}$ et $T_c = 1500\text{ K}$).
 En réalité, le rendement est plutôt $\eta_{\text{Brayton, réel}} \sim 30-45\%$
 En récupérant la chaleur des gaz d'échappement et en l'utilisant dans un cycle vapeur (comme un cycle de Rankine), $\eta_{\text{Brayton, combiné}} \sim 60-65\%$

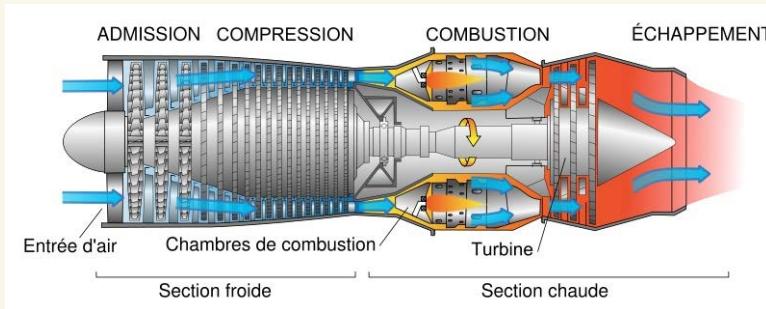
- Avantages des moteurs basés sur le cycle de Brayton :
 - simples et compacts => léger pour l'aviation
 - démarrage et montée en puissance rapide
 - haut rapport puissance/poids

- Désavantages :
 - consommation en carburant élevée
 - les températures et pressions en jeu sont très élevées, les contraintes mécaniques sont importantes
 - => matériaux, alliages coûteux
 - => maintenance régulière et coûteuse
 - le compresseur doit être performant pour assurer un bon rendement

Exemples de moteurs basés sur le cycle de Brayton:

- Turbo réacteur : * Le travail généré par la détente est utilisé : - pour faire tourner le compresseur - pour propulser le système vers l'avant en projetant le gaz vers l'arrière par la tuyère (action-reaction)

- * utilisé principalement sur les avions militaires
- * bruyant et consomme beaucoup



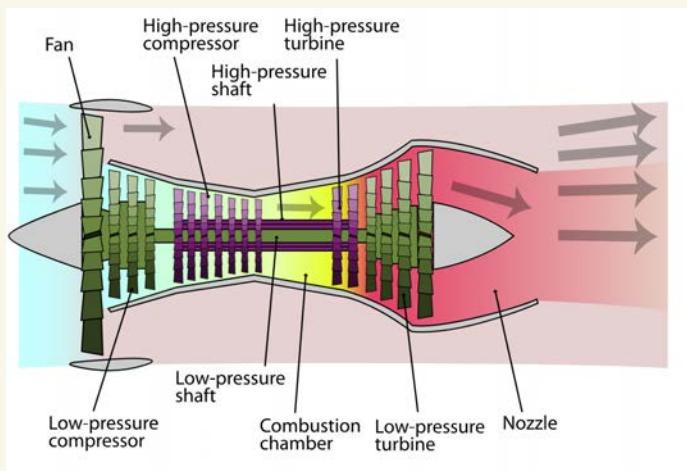
* augmentation du rendement avec une post-combustion



Shenyang
J-15

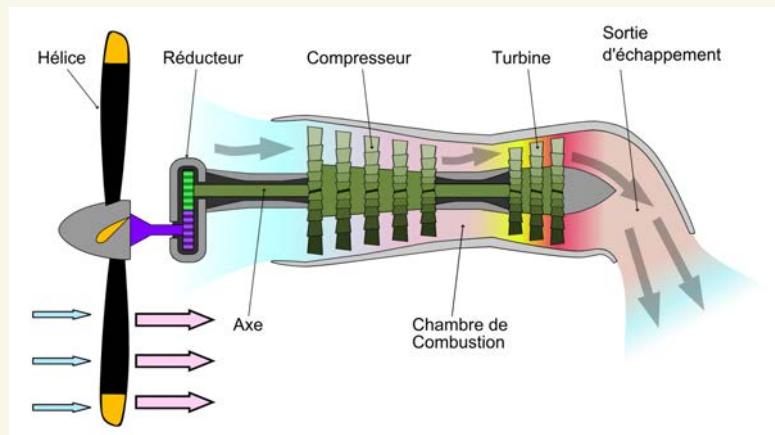
Shenyang
WS-10

- Turboréacteur à double flux (Turbotan) :
 - * Evolution du turbo réacteur
 - * Deux flux d'air : - flux d'air "chaud" qui est utilisé pour le cycle moteur et qui entraîne le compresseur, une soufflante (fan) et est éjecté
 - flux d'air "froid" qui est accéléré par la soufflante
- * Meilleure rendement que le turboréacteur, consomme moins de carburant et moins bruyant
- * La poussée est moindre, limitée par la soufflante
- * Utilisé dans l'aviation commerciale



Boeing 777 X
GE 9X

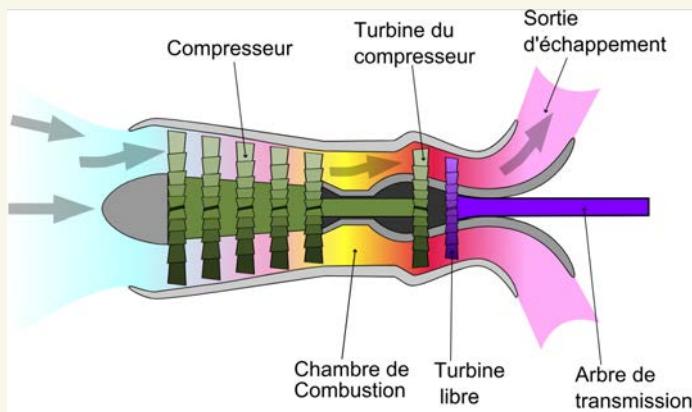
- Turbo propulseur :
 - * le travail utile généré par la turbine sert à entraîner une hélice multi-pale
 - * meilleure rendement que les turboréacteurs à basse vitesse ($v < 800 \text{ km/h}$) => consomme 20% à 40 % moins de carburant.
 - * vitesse limitée par le rendement aérodynamique de l'hélice



Pilatus PC-12
Pratt & Whitney PT6E-67 Xp

- Turbo moteur :

- * le travail utile permet la rotation d'un axe entraînant le rotor
- * utilisé sur des hélicoptères

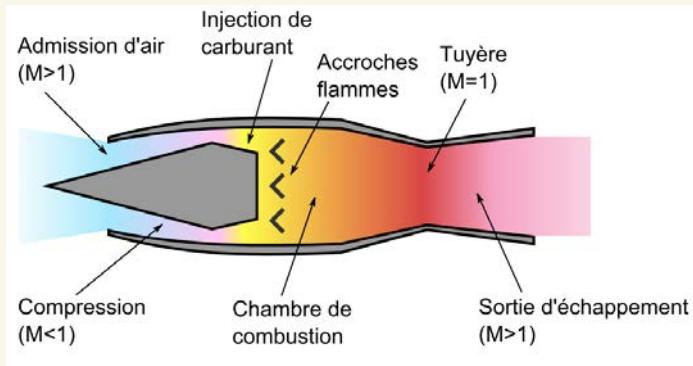


Aerospatiale SA315B
LAMA

Turbomeca Astazou
IIIB

• Statoréacteur :

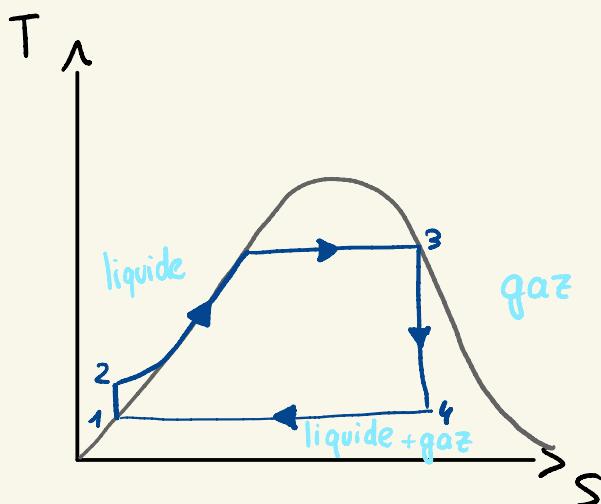
- * "stato" pour statique , il ne contient pas de pièces mobiles (pas de compresseur ni turbine).
- * rendement très efficace à haute vitesse (compression efficace à haute vitesse).
- * conception simple et légère
- * ne fonctionne pas à basse vitesse
- * utilisé pour des missiles et drones hypersoniques



7.5.2. Cycle de Rankine

- Cycle de la plupart des machines à combustion externe
- Utilisé dans le sens moteur dans les machines à vapeur et turbines à vapeur pour la propulsion de bateaux et la production d'électricité (centrales au charbon, nucléaires, biomasse, thermiques solaires...)
- Utilisé dans le sens inverse pour les réfrigérateurs et pompes à chaleur.

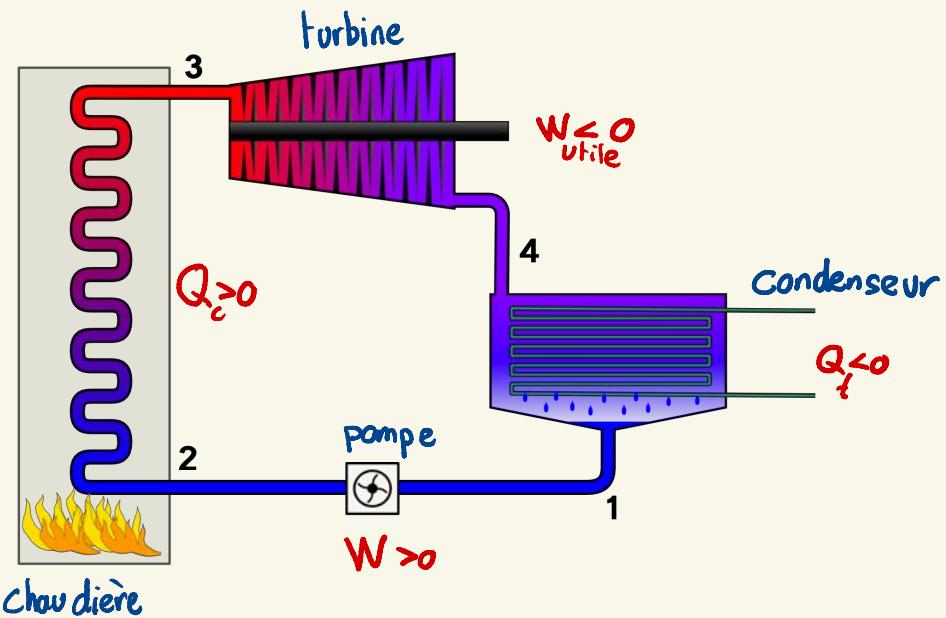
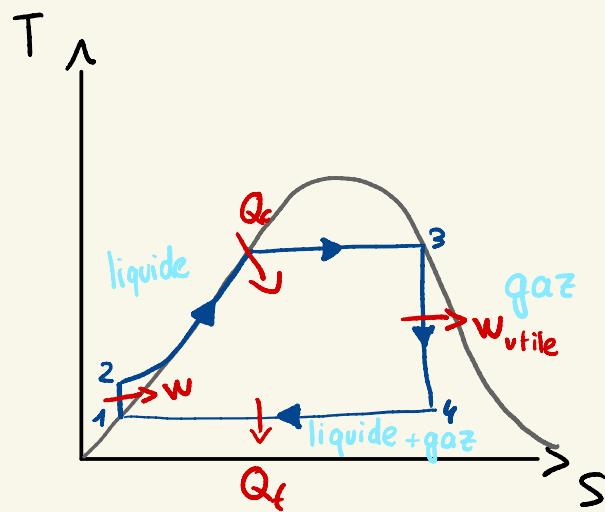
Le cycle fait intervenir des transitions de phase.



Le cycle idéal est

- 1-2 : compression isentropique (\Rightarrow adiabatique et réversible)
- 2-3 : vaporisation isobare irréversible
- 3-4 : détente isentropique (\Rightarrow adiabatique et réversible)
- 4-1 : liquéfaction isobare irréversible

Le cycle fait intervenir des transitions de phase.



- Le rendement est donné par

$$\eta_{\text{Rankine}} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$$

Le rendement est limité par la condensation de la vapeur
(la chaleur latente est perdue)

- Le rendement typique est $\eta_{\text{Rankine}} \sim 30-45\%$ dans une centrale à vapeur classique
- La différence principale avec le cycle de Carnot est que les isothermes sont remplacées par des isobares.

7.5.3. Autres cycles

Il existe une multitude de cycles thermodynamiques qui utilisent quasiment toutes les combinaisons possibles de transformation.

| Cycle | Compression, 1→2 | Heat addition, 2→3 | Expansion, 3→4 | Heat rejection, 4→1 | 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 engines |
| Hygroscopic | adiabatic | isobaric | adiabatic | isobaric | |
| Scuderi | adiabatic | variable pressure and volume | adiabatic | isochoric | |
| Stirling | isothermal | isochoric | isothermal | isochoric | Stirling engines |
| Manson | isothermal | isochoric | isothermal | isochoric then adiabatic | Manson and Manson-Guise engines |
| Stoddard | adiabatic | isobaric | adiabatic | isobaric | |
| Power cycles normally with internal combustion: | | | | | |
| Atkinson | isentropic | isochoric | isentropic | isochoric | Differs from Otto cycle in that $V_1 < V_4$. |
| Brayton | adiabatic | isobaric | adiabatic | isobaric | Ramjets, turbojets, -props, and -shafts. Originally developed for use in reciprocating engines. The external combustion version of this cycle is known as the first Ericsson cycle from 1833. |
| Diesel | adiabatic | isobaric | adiabatic | isochoric | Diesel engine |
| Humphrey | isentropic | isochoric | isentropic | isobaric | Shramjets, pulse- and continuous detonation engines |
| Lenoir | | isochoric | adiabatic | isobaric | Pulse jets. 1→2 accomplishes both the heat rejection and the compression. Originally developed for use in reciprocating engines. |
| Otto | isentropic | isochoric | isentropic | isochoric | Gasoline / petrol engines |