

THERMODYNAMIQUE

1^{er} principe de la thermodynamique

Travail, chaleur et énergie interne

Transformations d'état

Cycles et machines thermiques

Rendement d'une machine thermique

Cycle de Carnot

Moteur de Stirling

2^{ème} principe de la thermodynamique, Entropie

PGC-11

RÉSUMÉ DES TRANSFORMATIONS

Pour toutes : $\Delta U = Q + W_s$

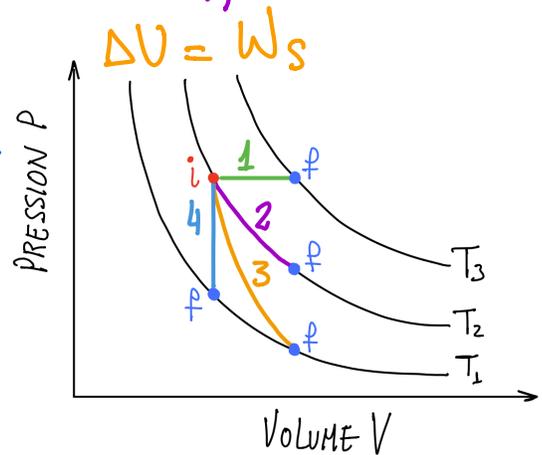
$$\Delta U = n C_v \Delta T$$

1) $P = \text{const}$ Isobare $Q = n C_p \Delta T$ $W_s = -P \Delta V$

2) $T = \text{const}$ Isotherme $Q = -W_s = n R T \ln \frac{V_f}{V_i}$ $\Delta U = 0$

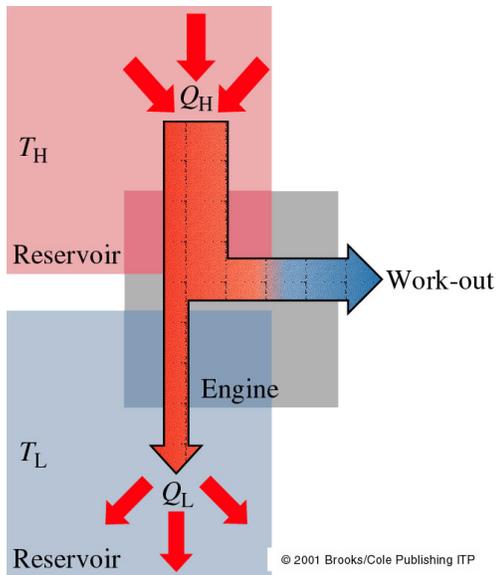
3) $PV^\gamma = \text{const}$ Adiabatique $Q = 0$

4) $V = \text{const}$ Isochore $Q = \Delta U = n C_v \Delta T$
 $W = 0$



MOTEURS THERMIQUES

Un moteur thermique est un dispositif cyclique qui convertit l'énergie thermique en travail qu'il cède à l'extérieur.



$$Q_H > 0$$

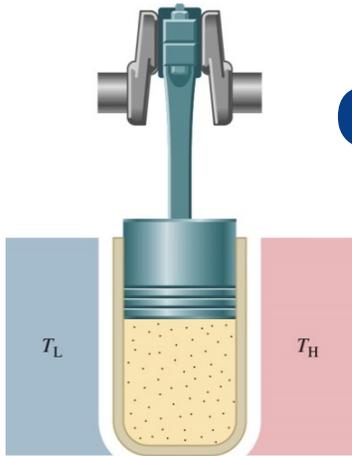
$$Q_L < 0$$

chaleur absorbée $Q = |Q_H| - |Q_L| > 0$

$$W_s = -Q$$

$$W = -W_s$$

$$Q_L \neq 0$$



© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP

CYCLE DE CARNOT

W: Travail SUR le système!

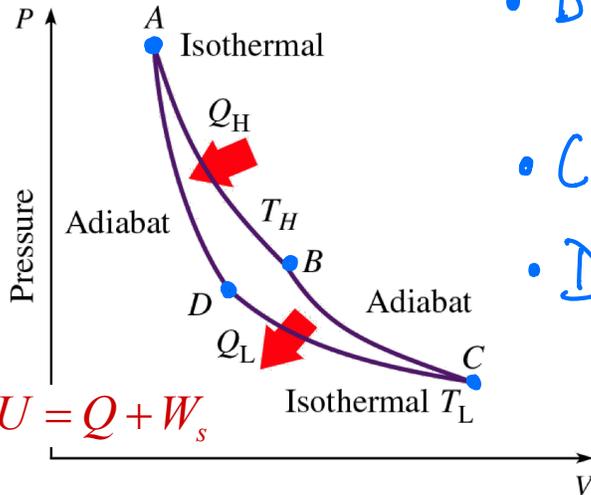
Le cycle de Carnot est un cycle idéal qui ne correspond à aucun moteur réalisable, fonctionnant selon un cycle réversible.

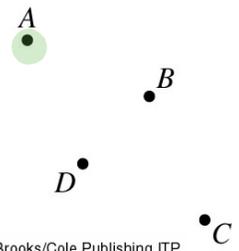
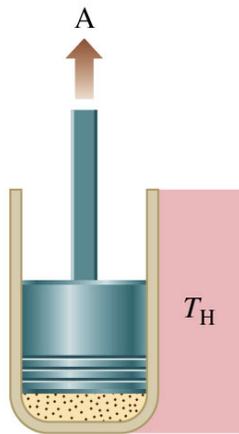
• $A \rightarrow B$ détente isotherme $\Delta U = 0$
 $W < 0$ $Q_H > 0$

• $B \rightarrow C$ détente adiabatique P, V, T
 $Q = 0$ $W = \Delta U < 0$

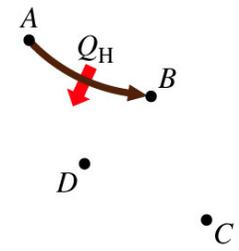
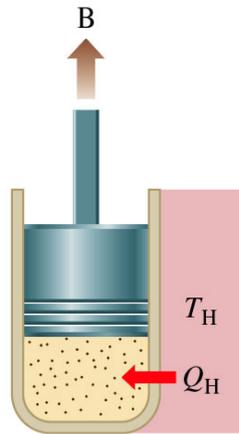
• $C \rightarrow D$ $\Delta U = 0$ $W > 0$ $Q_L < 0$

• $D \rightarrow A$ $Q = 0$ $W = \Delta U > 0$

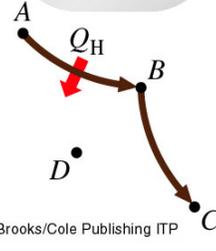
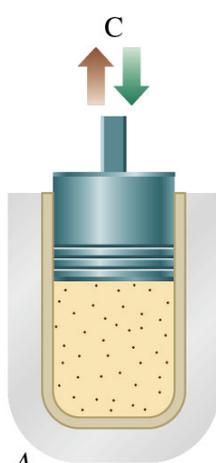




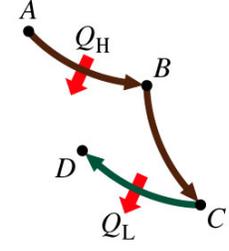
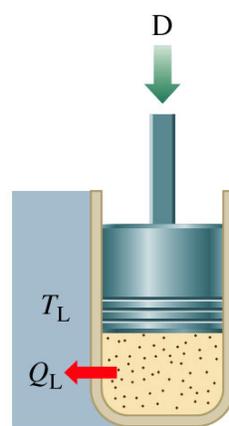
© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP



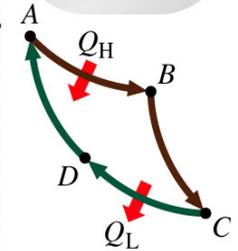
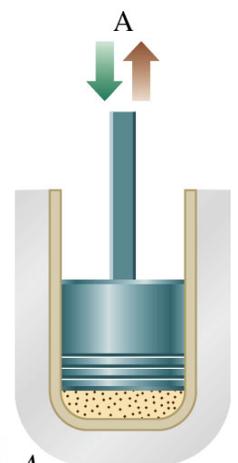
1. détente isotherme



2. détente adiabatique



3. compression isotherme



4. compression adiabatique

© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP

RENDEMENT D'UNE MACHINE THERMIQUE

$$r = \frac{\text{énergie disponible sortante}}{\text{Énergie entrante}} = \frac{\hat{\text{énergie utile}}}{\text{Énergie fournie}}$$

carnot : idéal : efficacité max.

$$W = Q_H - Q_L$$

$$r = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

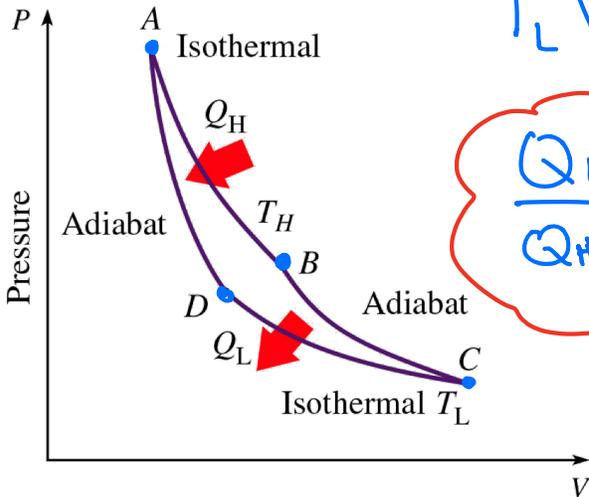
RENDEMENT DU CYCLE DE CARNOT

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{nRT_L \ln(V_C/V_D)}{nRT_H \ln(V_B/V_A)}$$

$$T_H V_B^{\gamma-1} = T_L V_C^{\gamma-1}$$

$$T_L V_D^{\gamma-1} = T_H V_A^{\gamma-1}$$

⇒ $\frac{V_C}{V_D} = \frac{V_B}{V_A}$ et donc:



$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H}$$

Alors:

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

rendement MAX

$\eta \neq 1$

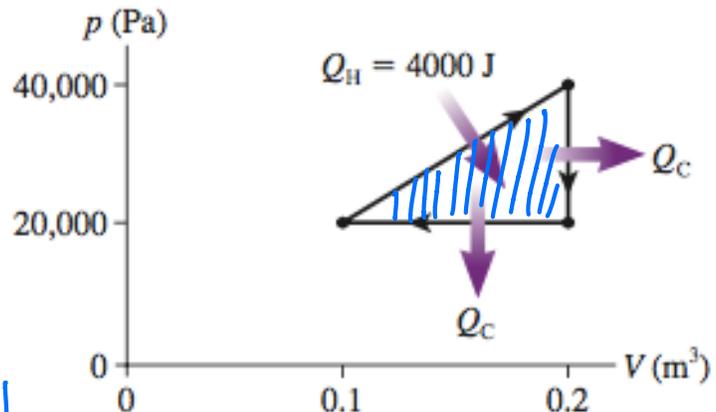
$T_L = 0$ $T_H = \infty$
impossible

QUESTION

$$r = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H}$$

Trouver le rendement de la machine décrite par le diagramme P-V dessus.

- (a) 0.10
- (b) 0.50
- (c) 0.25
- (d) 4
- (e) On peut dire puisqu'on ne connaît pas Q_C



$$Q_H = 4000 \text{ J}$$

$$|W| = \frac{1}{2} \cdot 20000 \cdot 0,1 \text{ J} = 1000 \text{ J}$$

$$\Rightarrow r = \frac{1000}{4000} = 0.25$$

QUESTION

$$\Gamma_{\max} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Est-ce que la machine à côté est possible à construire?

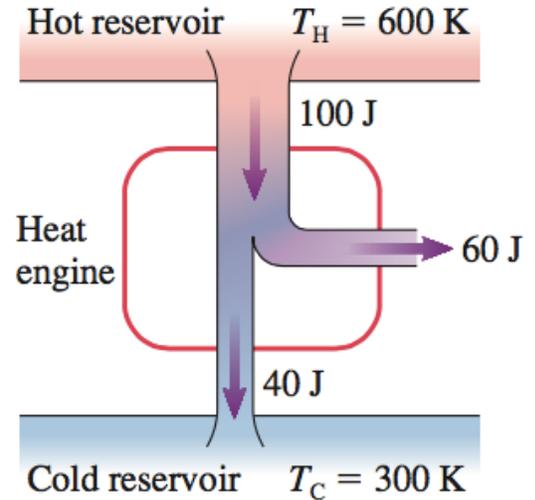
(a) Oui

(b) Non

(c) On ne peut pas dire

$$\Gamma_{\max} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 0.5$$
$$\Gamma = \frac{W}{Q_H} = \frac{60}{100} = 0.6$$

} impossible!



Données: Cycle Carnot

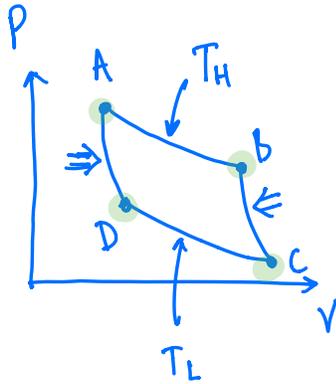
$$n = 0.2 \text{ moles} \quad \gamma = 1.40$$

$$T_H = 227^\circ \text{C} = 500 \text{ K}$$

$$T_L = 27^\circ \text{C} = 300 \text{ K}$$

$$V_B = 2V_A \quad C_V$$

$$P_A = 10 \times 10^5 \text{ Pa}$$



$$PV = nRT$$

- a) P, V, T A, B, C, D
- b) Q, W, ΔU
- c) r
- d) γ_{max}

$$A: T_A, P_A \quad V_A = \frac{nRT_H}{P_A}$$

$$B: V_B = 2V_A \quad T_A = T_B \Rightarrow P_B V_B = P_A V_A \Rightarrow P_B = \frac{P_A V_A}{V_B}$$

$$C: T_L V_C^{\gamma-1} = T_H V_B^{\gamma-1} \Rightarrow V_C = \dots \quad T_C = T_L$$

$$P_C = \frac{nRT_L}{V_C}$$

$$D: T_H V_A^{\gamma-1} = T_L V_D^{\gamma-1} \Rightarrow V_D = \dots$$

$$P_D = \frac{nRT_L}{V_D}$$

$$\begin{aligned}
A \rightarrow B \text{ isotherme} & \quad \Delta U_{AB} = 0 & \quad W_{sAB} = -Q_H = -nRT_H \ln \frac{V_B}{V_A} \\
B \rightarrow C \text{ adiabatique} & \quad Q_{BC} = 0 & \quad \Delta U_{BC} = W_{jBC} = nC_V(T_L - T_H) \\
C \rightarrow D \text{ isotherme} & \quad \Delta U_{CD} = 0 & \quad W_{sCD} = -Q_L = -nRT_L \ln \frac{V_D}{V_C} \\
D \rightarrow A \text{ adiabatique} & \quad Q_{DA} = 0 & \quad \Delta U_{DA} = W_{DA} = nC_V(T_H - T_L)
\end{aligned}$$

Processus	Q	W_s	ΔU
AB	576 J	-576 J	0
BC	0	-832 J	-832 J
CD	-346 J	346 J	0
DA	0	832 J	832 J

TOTAL	230 J	-230 J	0
-------	-------	--------	---

$W = -W_s = |W_s|$

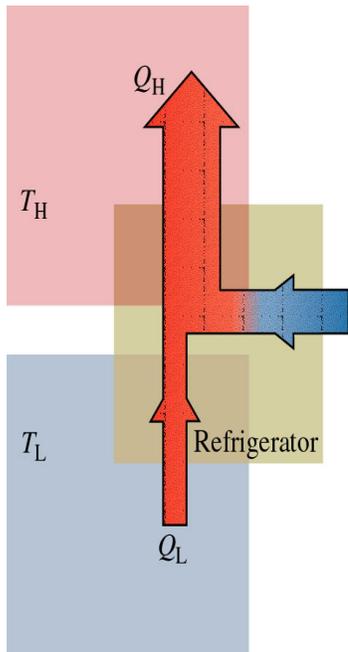
$$r = \frac{W}{Q_H} = 40\%$$

$$r_{\max} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{500} = 40\%$$

NORMAL ☺

RÉFRIGÉRATEURS ET CLIMATISEURS

Réfrigérateur \approx moteur thermique marchant à l'envers



$$Q_L + W = Q_H$$

$$W = Q_H - Q_L$$

Coefficient de performance $\eta = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$

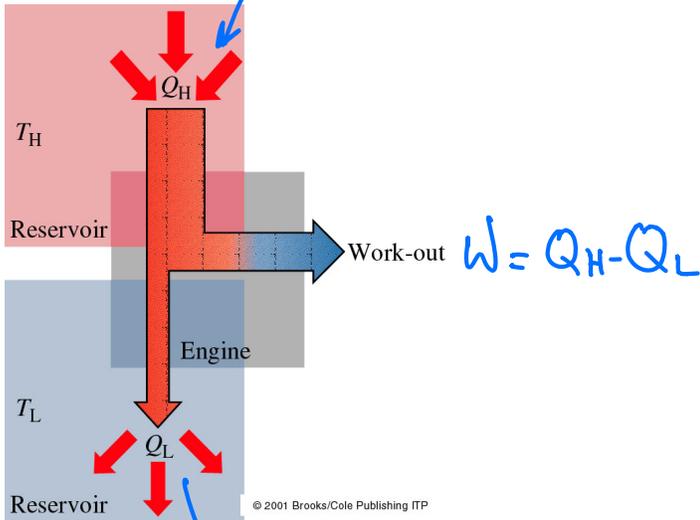
$\eta \uparrow$ machine efficace 5

$$\eta_c = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

RÉSUMÉ - MACHINES

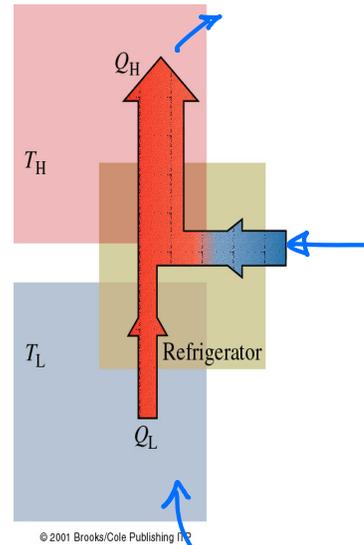
$$r = \frac{Q_L}{W} \leq \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

Machine thermique

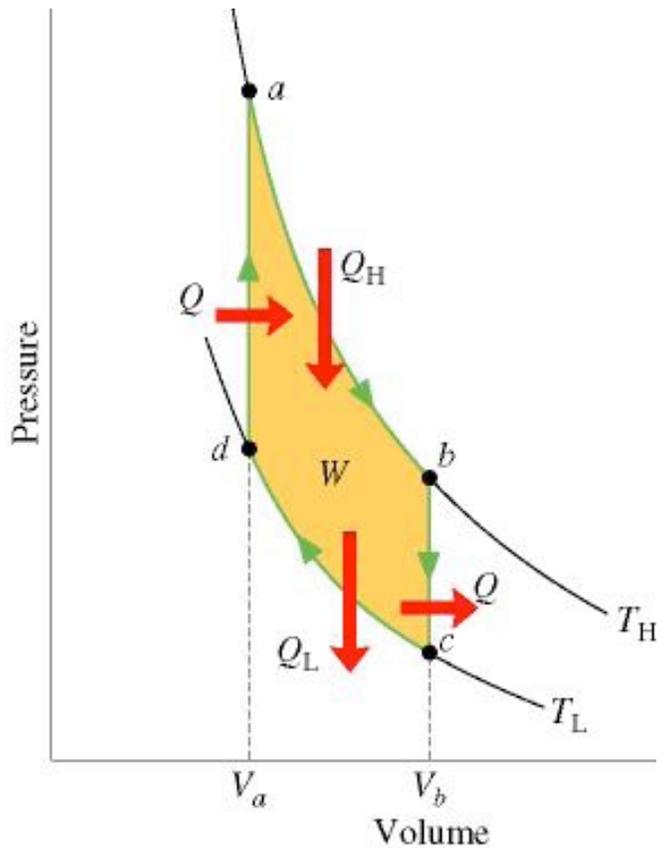


$$r = \frac{Q_H}{W} < 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Réfrigérateur



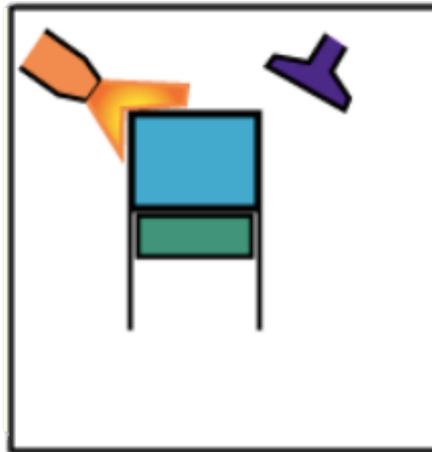
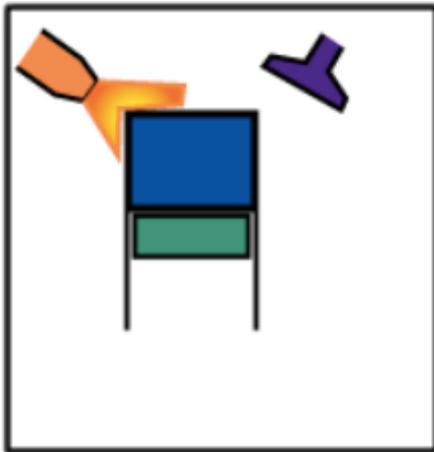
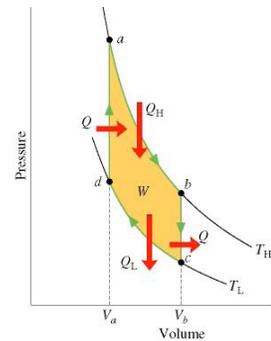
MOTEUR DE STIRLING – 0.



MOTEUR DE STIRLING – 1.

Un chauffage isochore

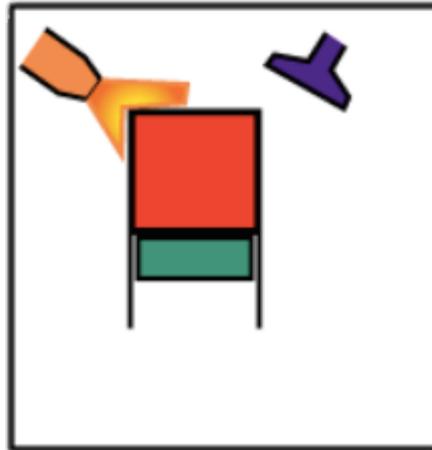
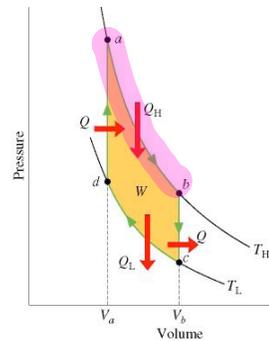
Le brûleur (la source chaude) cède de l'énergie thermique. On s'imagine aisément que la pression et la température du gaz augmentent durant cette phase.



MOTEUR DE STIRLING – 2.

Une détente isotherme

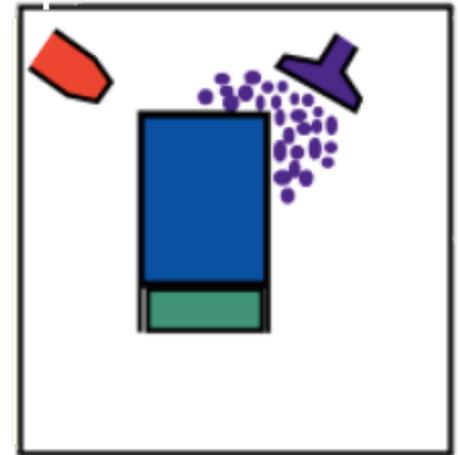
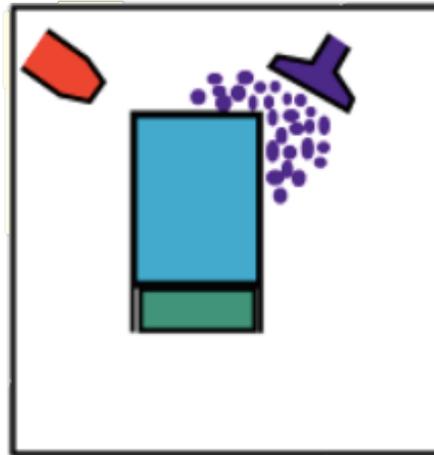
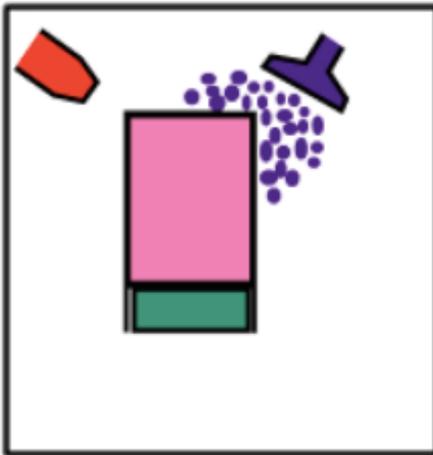
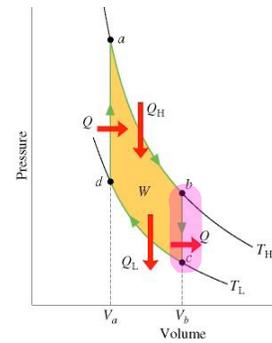
Le volume s'accroît alors que la pression diminue. C'est pendant cette transformation que l'énergie motrice est produite.



MOTEUR DE STIRLING – 3.

Un refroidissement isochore

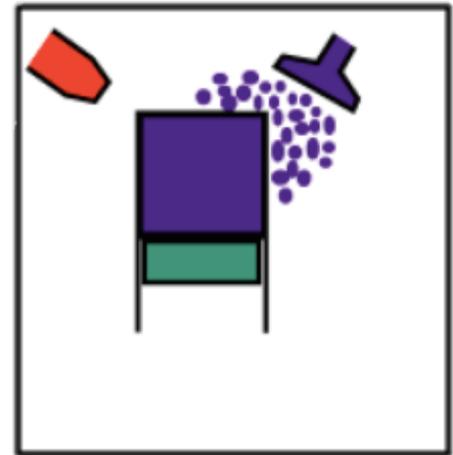
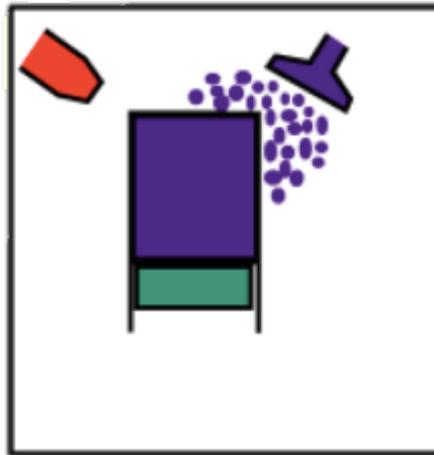
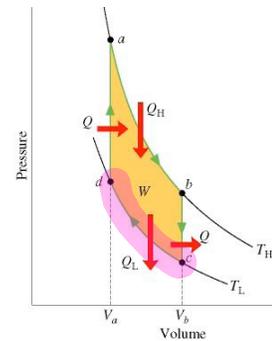
L'eau projetée (la source froide) récupère de l'énergie thermique. La température et la pression diminuent pendant cette phase.



MOTEUR DE STIRLING – 4.

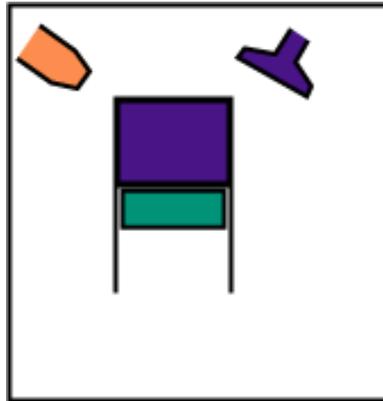
Une compression isothermique

La pression du gaz augmente au fur et à mesure que son volume diminue.



MOTEUR DE STIRLING – 5.

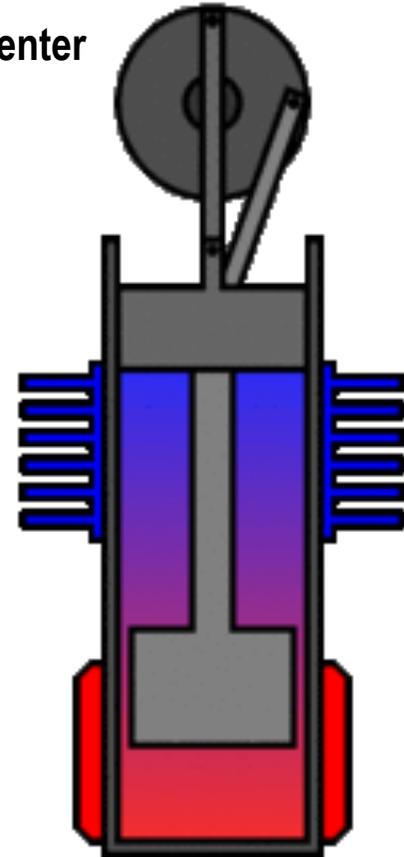
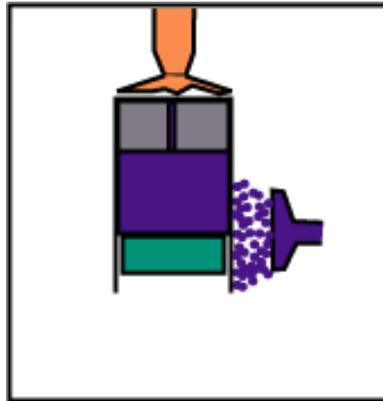
Il est peu pratique d'alterner la source thermique pour implémenter ces cycles thermiques dans un moteur.



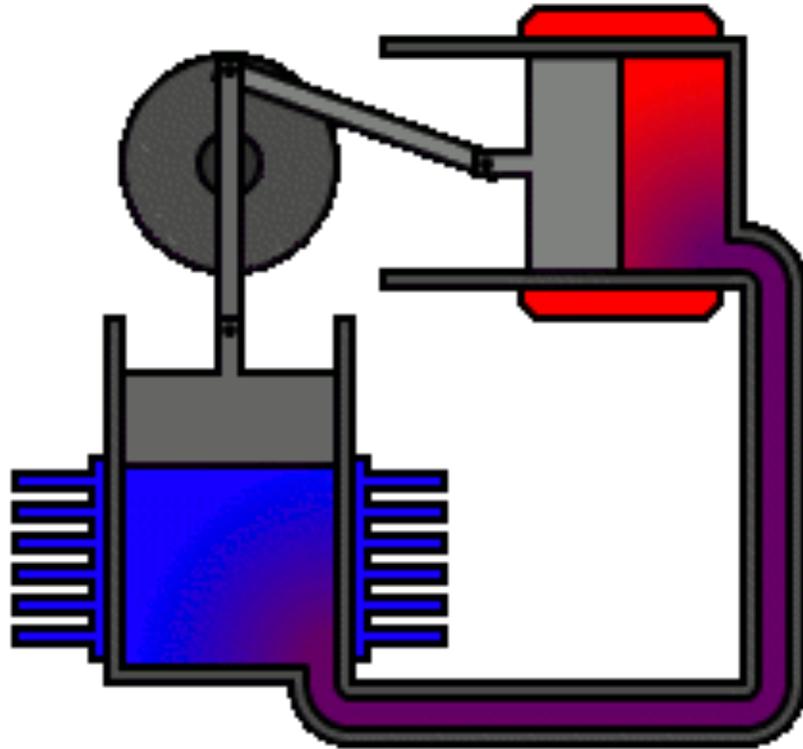
MOTEUR DE STIRLING – 6.

Il est peu pratique d'alterner la source thermique pour implémenter ces cycles thermiques dans un moteur.

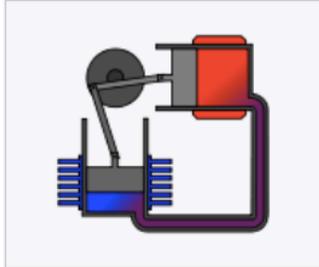
1817: Révérend Robert Stirling met au point un mécanisme qui réalise un moteur fonctionnel basé sur ces principes de thermodynamiques.



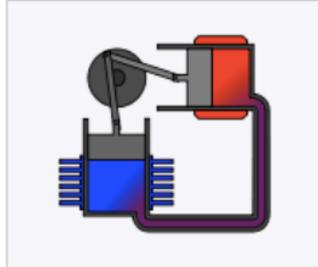
MOTEUR DE STIRLING – 7.



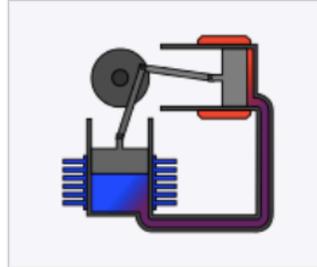
MOTEUR DE STIRLING – 8.



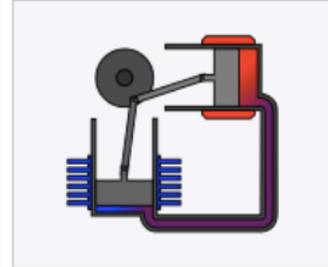
1. Le gaz de travail, chauffé au contact des parois du **cylindre chaud**, tend à occuper plus de place et repousse le **piston chaud** au fond de sa course (vers la gauche). Lorsqu'il est arrivé en butée, l'expansion du gaz se poursuit en direction du **cylindre froid** et repousse le **piston froid** (vers le haut). Ces mouvements sont transmis à la roue.



2. Le gaz est maintenant à son volume maximal. La roue transmet son mouvement au **piston chaud** (vers la droite), ce qui envoie la plus grande partie du gaz vers le **cylindre froid**, où il va se refroidir.



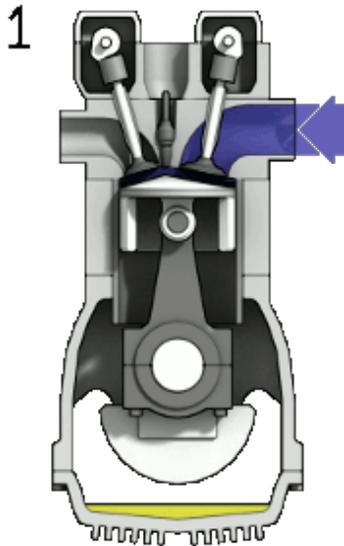
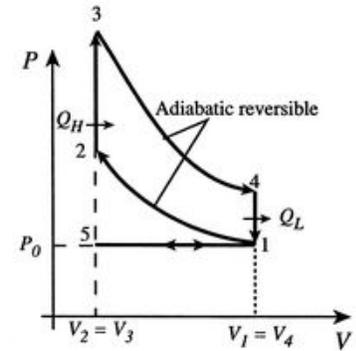
3. Presque tout le gaz est maintenant dans le **cylindre froid** et le refroidissement du gaz continue. La pression du gaz est à son minimum. Il se contracte et le **piston froid** redescend.



4. Le gaz est maintenant à son volume minimum et le **piston chaud** est tiré vers la gauche par la roue et les transmissions. Le gaz est ainsi aspiré dans le **cylindre chaud**. Comme il se réchauffe, son volume augmente et le cycle recommence.

Source: wikipedia

FOUR-STROKE ENGINE



Four-stroke cycle used in gasoline/petrol engines:

- intake (1),
- compression (2),
- power (3), and
- exhaust (4).

The right blue side is the intake port and the left brown side is the exhaust port. The cylinder wall is a thin sleeve surrounding the piston head which creates a space for the combustion of fuel and the genesis of mechanical energy.

Sources:

Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Four-stroke_engine_
<https://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node27.html>

DIESEL ENGINE

High compression ratio raises temperature: no need for spark-ignition!

