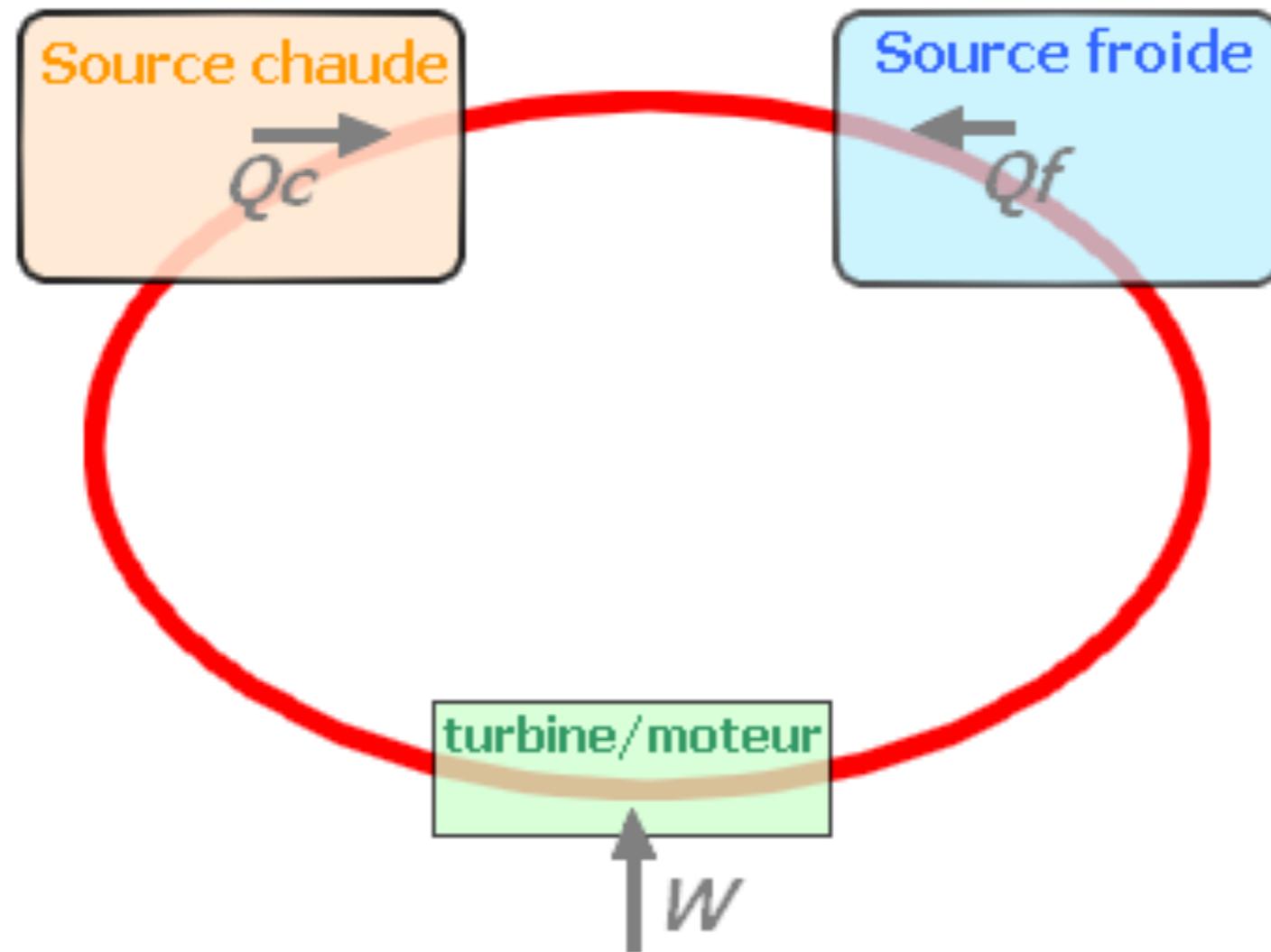


# Machines thermiques

# Machines thermiques et la thermodynamique



Une **machine thermique** est un système qui peut effectuer un **nombre indéfini de cycles**, échangeant, au cours d'un cycle, une quantité de chaleur  $Q_c$  avec une source chaude (à la température  $T_c$ ) et une quantité de chaleur  $Q_f$  avec source froide (à la température  $T_f$ ), et un travail  $W$  avec le milieu extérieur.

# Machines thermiques :

(i) qui font la **conversion de chaleur en travail** - on les appelle »**machines motrices** ( $W > 0$ ) «

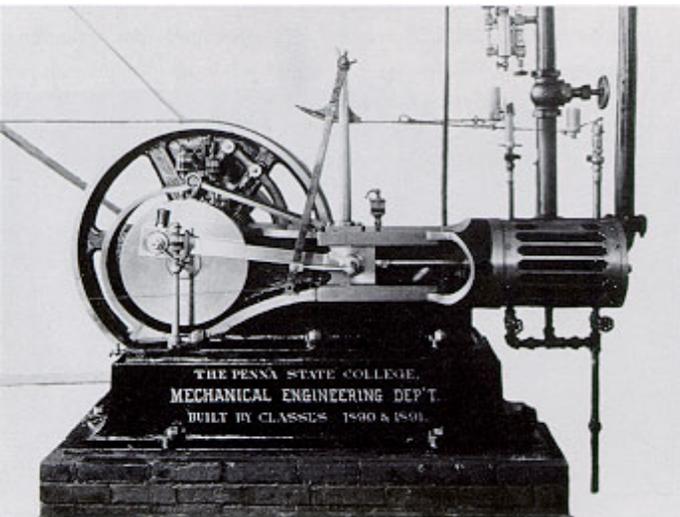
et

(ii) celles qui **transfèrent de la chaleur** d'une source froide vers une source chaude, on les appelle »**appareils frigorifiques** « - si le but recherché est de **refroidir** ou de maintenir froide une source froide;

on les appelle »**pompes à chaleur** « - si le but recherché est de réchauffer ou de maintenir chaude une source chaude.

## Exemples des machines thermiques

- De nombreuses machines thermiques sont d'un usage courant:
- les **machines à vapeur**,
- les moteurs à **combustion interne** (qui ont largement remplacé les machines à vapeur),
- les moteurs à **combustion externe** (moteurs Stirling),
- les réfrigérateurs,
- les pompes à chaleur...



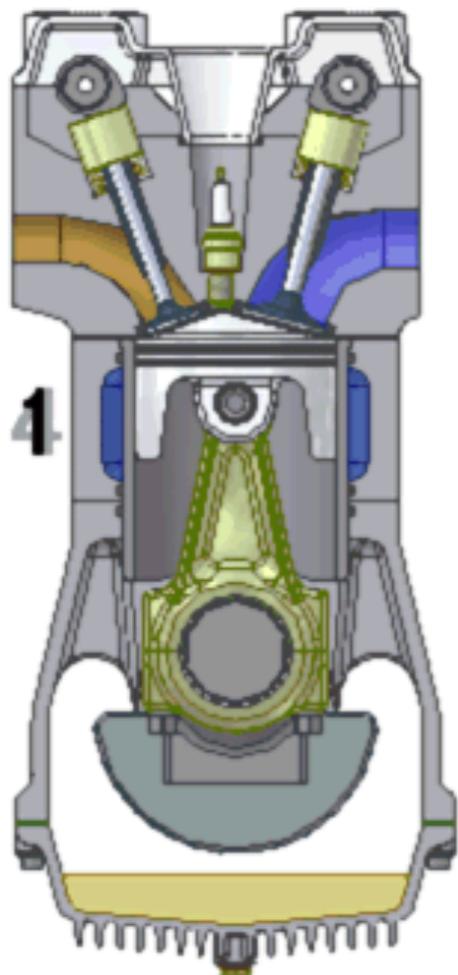
**Machine à vapeur:**  
Thomas Savery (1698)  
Thomas Newcomen (1712)  
**James Watt (1769)**



George Stephenson(1816)



Robert Fulton (1807)



Nicolaus Otto(1876)

Robert Stirling (1816)

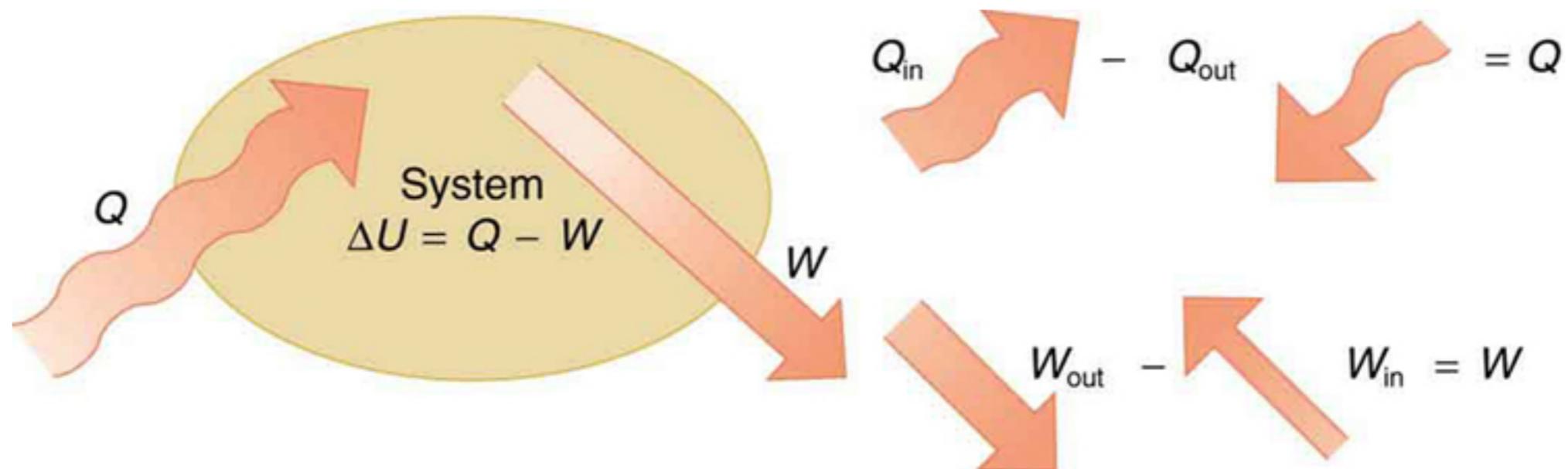


# La thermodynamique

- Étude de l'énergie thermique, son transfert, sa transformation, sa dégradation et sa dispersion
- But pratique à partir de 1830 : comprendre les machines à vapeur

# Le premier principe de la thermodynamique

- L'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais transférée seulement d'un système à un autre et transformée d'une forme à une autre.



# Le premier principe de la thermodynamique

Une forme de la loi la plus **fondamentale** de la physique : la **loi de conservation de l'énergie**, formulée au début du XXème siècle:

**L'énergie totale** de tout **système isolé** du reste de l'Univers **reste constante**.

Cependant, elle peut être transformée d'une forme à une autre à l'intérieur du système.

# Le premier principe de la thermodynamique

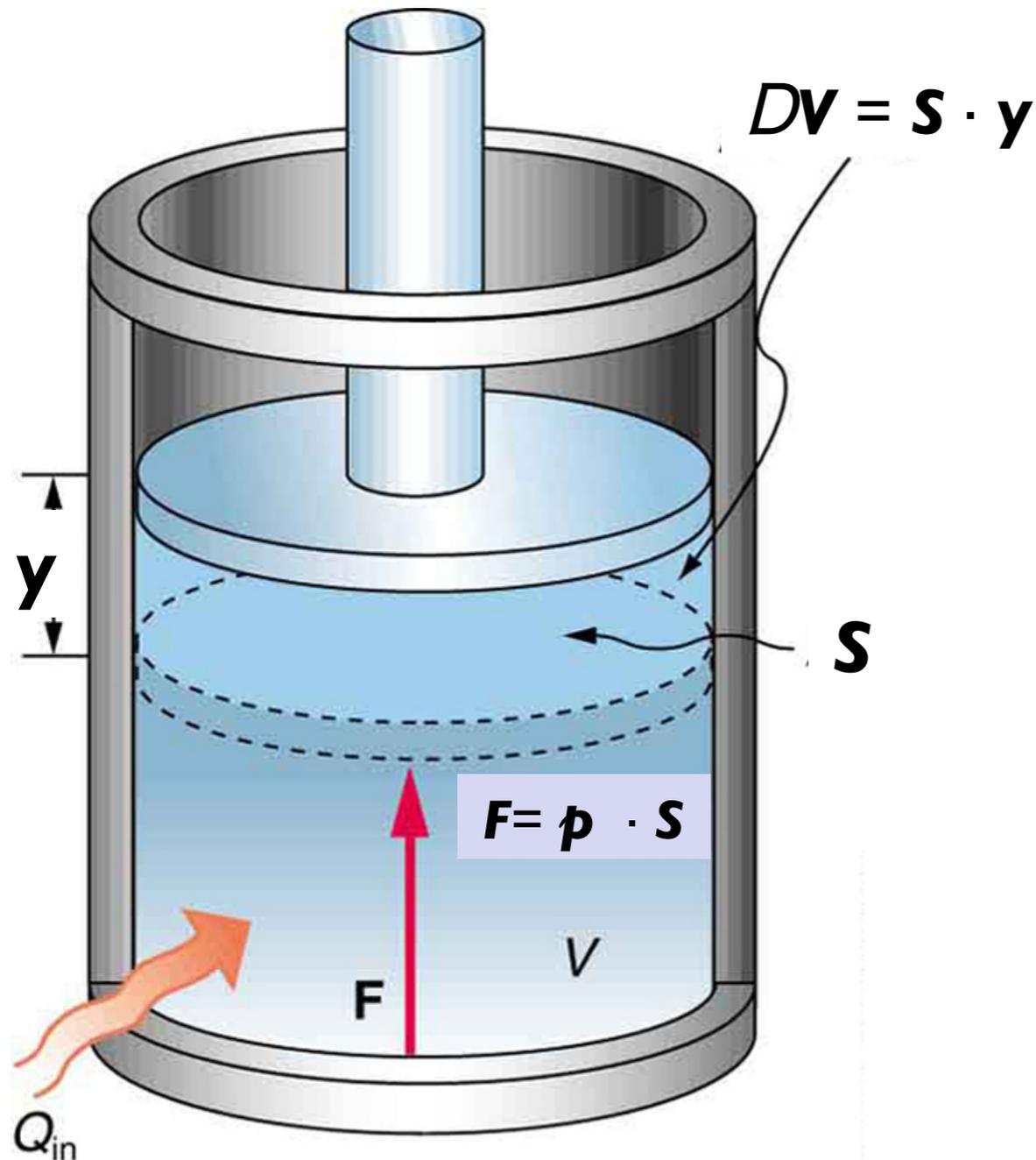
- L'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais transférée seulement d'un système à un autre et transformée d'une forme à une autre.

# Travail et chaleur

- **Q** (la chaleur) et **W** (le travail) correspondent à des transferts d'énergie spécifiques
- Dans la machine à vapeur, on fournit la chaleur (**Q**) et la machine fait du travail (**W**)
- Convention de signe : **W** > 0 si le système fait le travail, **Q** > 0 si le système reçoit la chaleur

$$\Delta U = Q - W$$

# Transformation de la chaleur en travail : on chauffe le gaz dans un cylindre



$$W = F \cdot y$$

$$F = p \cdot S$$

$$W = p \cdot S \cdot y$$

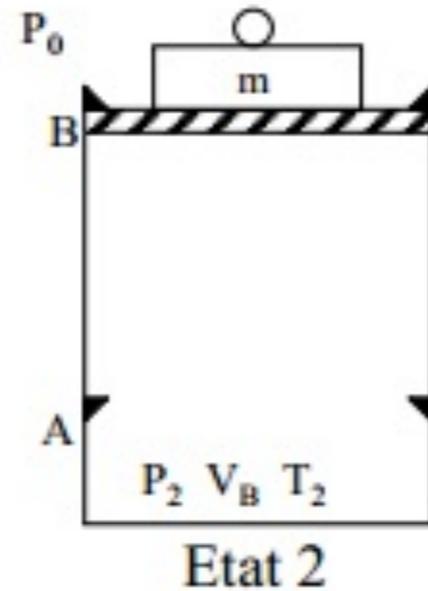
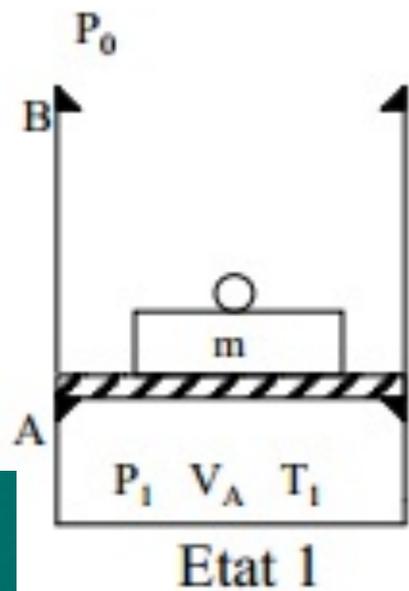
$$DV = S \cdot y$$

$$W = p \cdot DV$$

$$W = F \cdot y = p \cdot DV$$

# Transformation de la chaleur en travail

Transformation isobare  
( $p = \text{constante}$ )



$$p_1, V_1, T_1$$

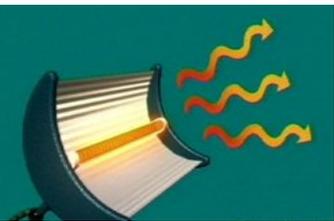
$$p_2, V_2, T_2$$

$$p_1 = p_2$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

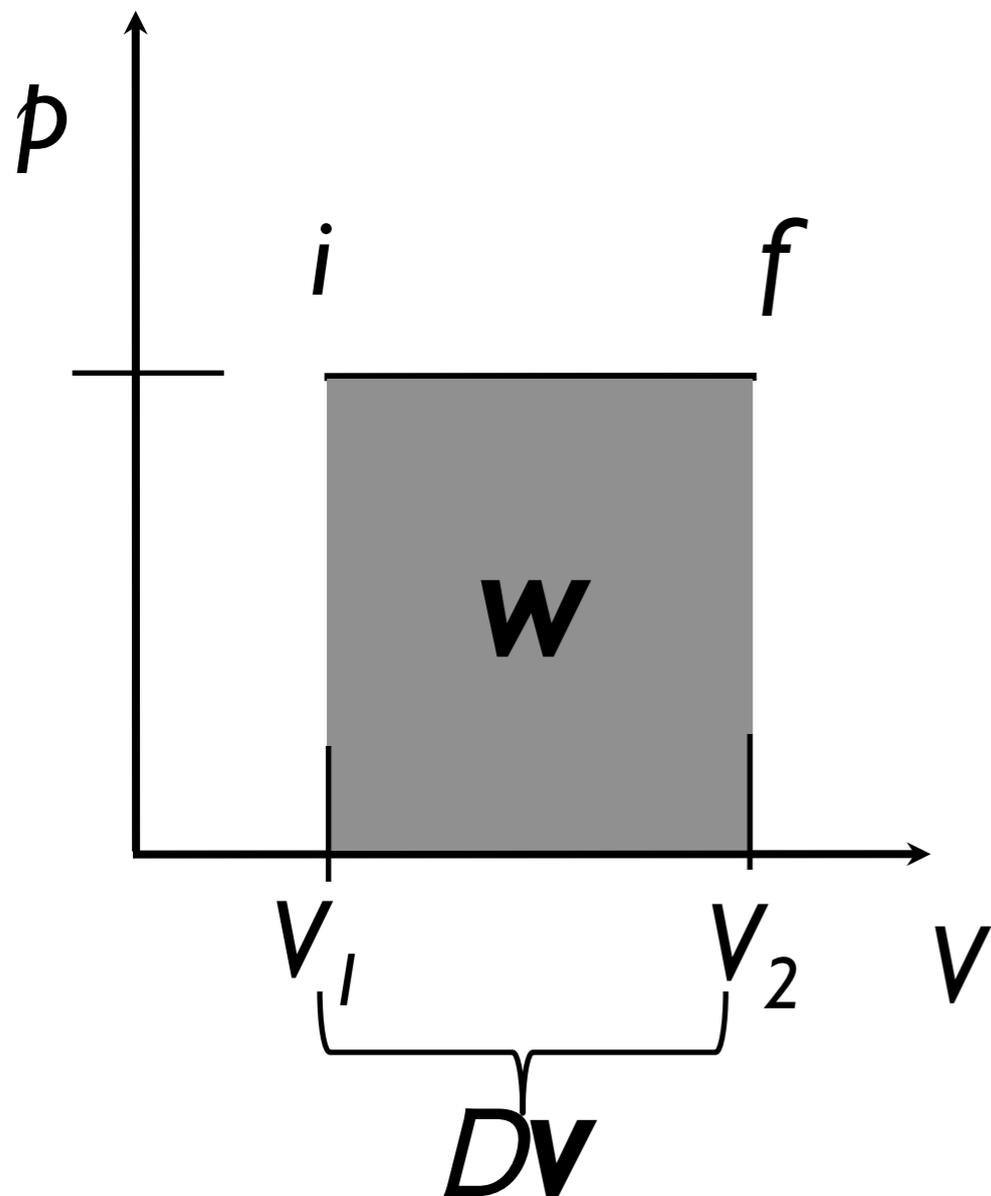
$$W = F \Delta y = pS \Delta y$$

$$W = p \Delta V$$



# Transformation de la chaleur en travail

Diagramme  $pV$



Transformation isobare  
( $p = \text{constante}$ )

$$W = p\Delta V$$

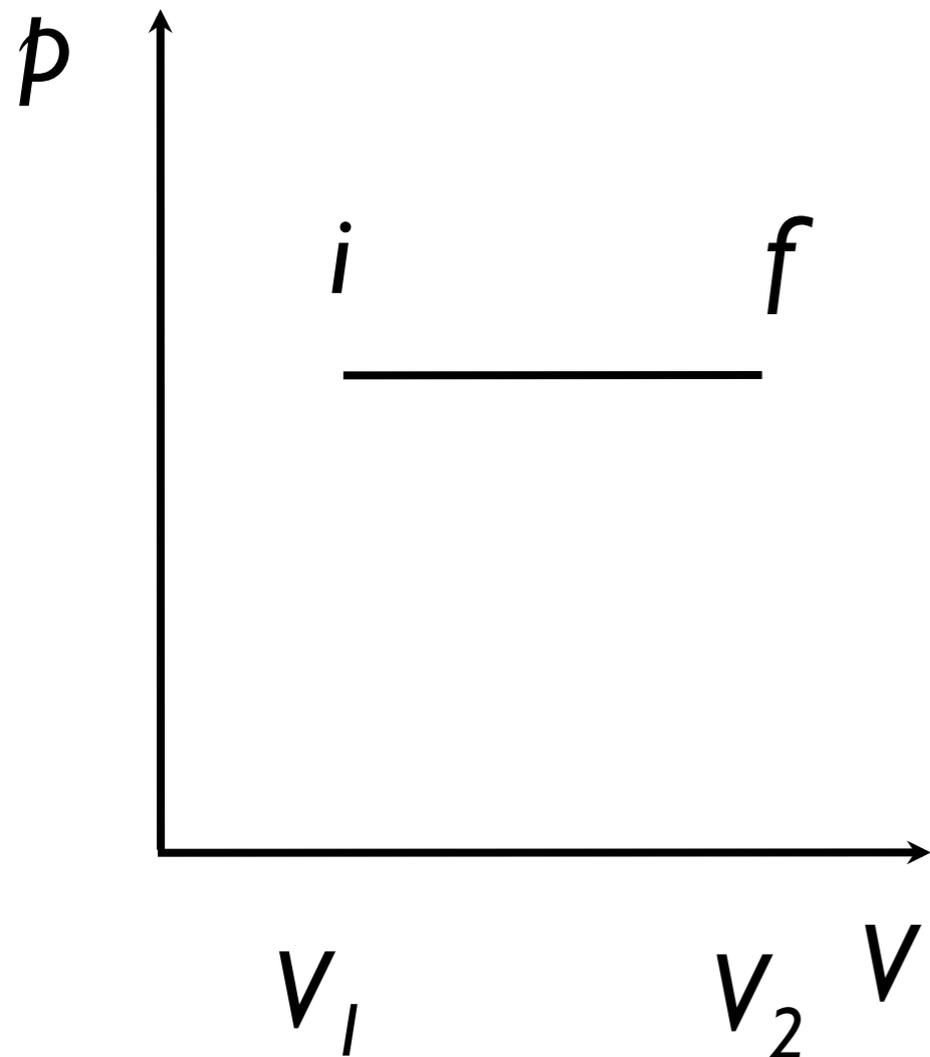
# Etat, équilibre, réversibilité

- Un système est en équilibre s'il n'a aucune tendance à subir un changement macroscopique spontané
- $(p, V, T)$  – paramètres (grandeurs) macroscopiques qui caractérisent un état
- en effectuant un travail ou en apportant de la chaleur à un gaz, on change ces grandeurs macroscopiques, donc on change l'état
- Ces changements d'état sont réversibles si, pendant une transformation, les paramètres  $(p, V, T)$  sont toujours bien définis

# Transformations d'un gaz idéal

- **Isobare**
  - Une transformation est isobare si la pression du système reste constante
- **Isochore**
  - ... le volume du système reste constante
- **Isotherme**
  - ... le température du système reste constante
- **Adiabatique**
  - Absence de l'échange de chaleur avec l'environnement

# Transformation isobare



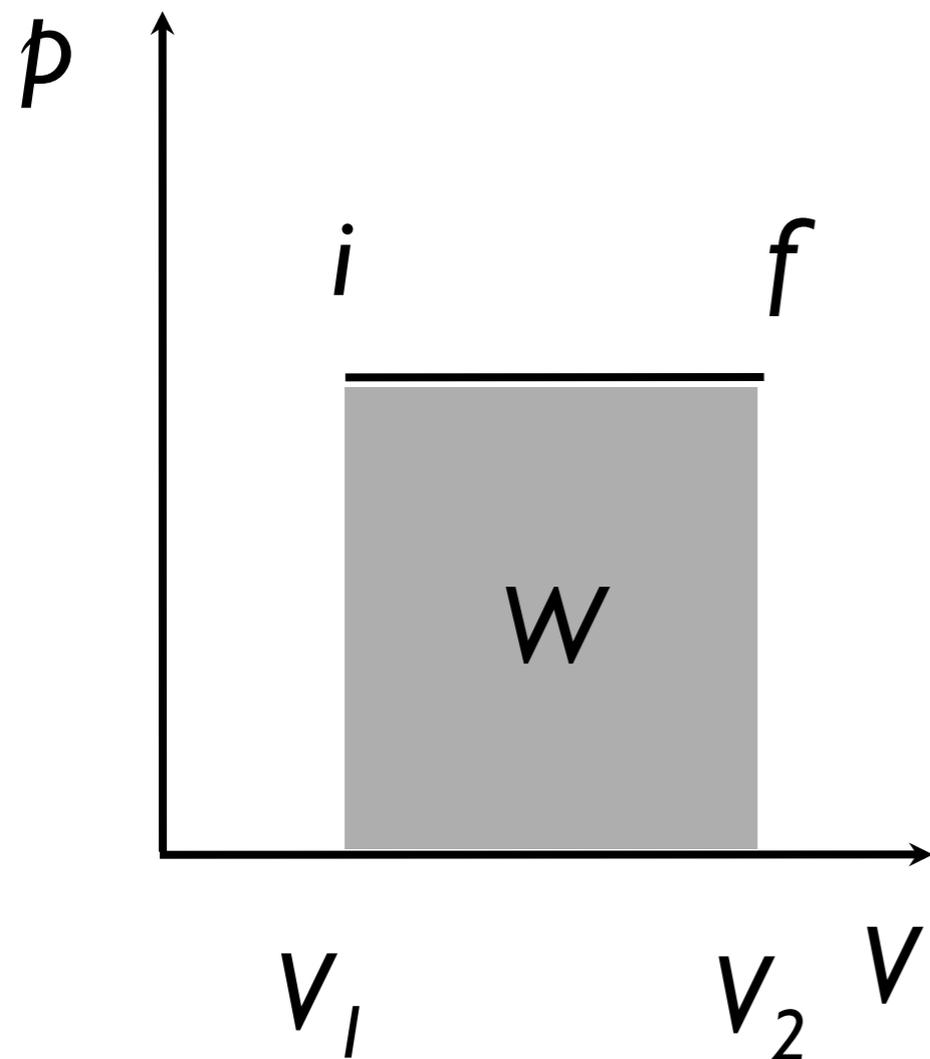
$$\Delta U = Q - W$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} Nk_B \Delta T$$

$$W = p\Delta V = Nk_B \Delta T$$

$$Q = \Delta U + W = \frac{5}{2} Nk_B \Delta T$$

# Transformation isobare

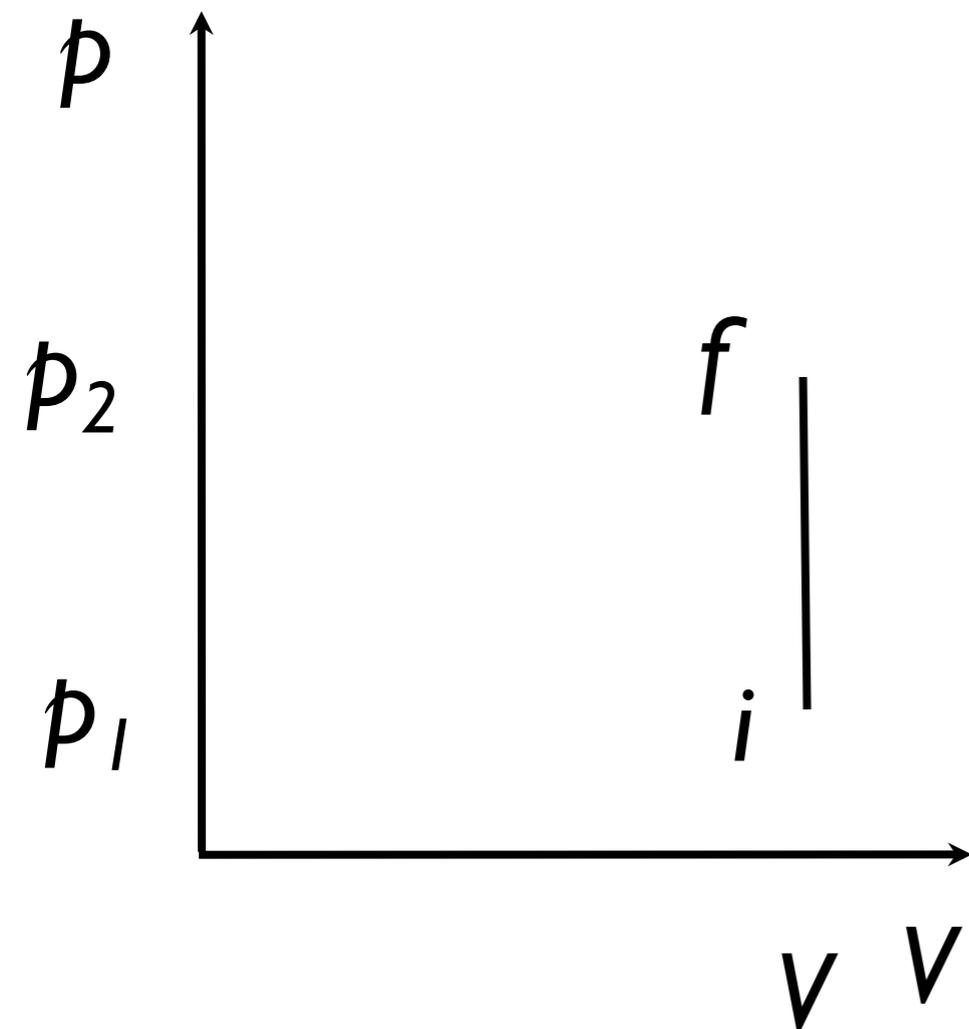


$$\Delta U = \frac{3}{2} Nk_B \Delta T$$

$$W = p\Delta V = Nk_B \Delta T$$

$$Q = \Delta U + W = \frac{5}{2} Nk_B \Delta T$$

# Transformation isochore



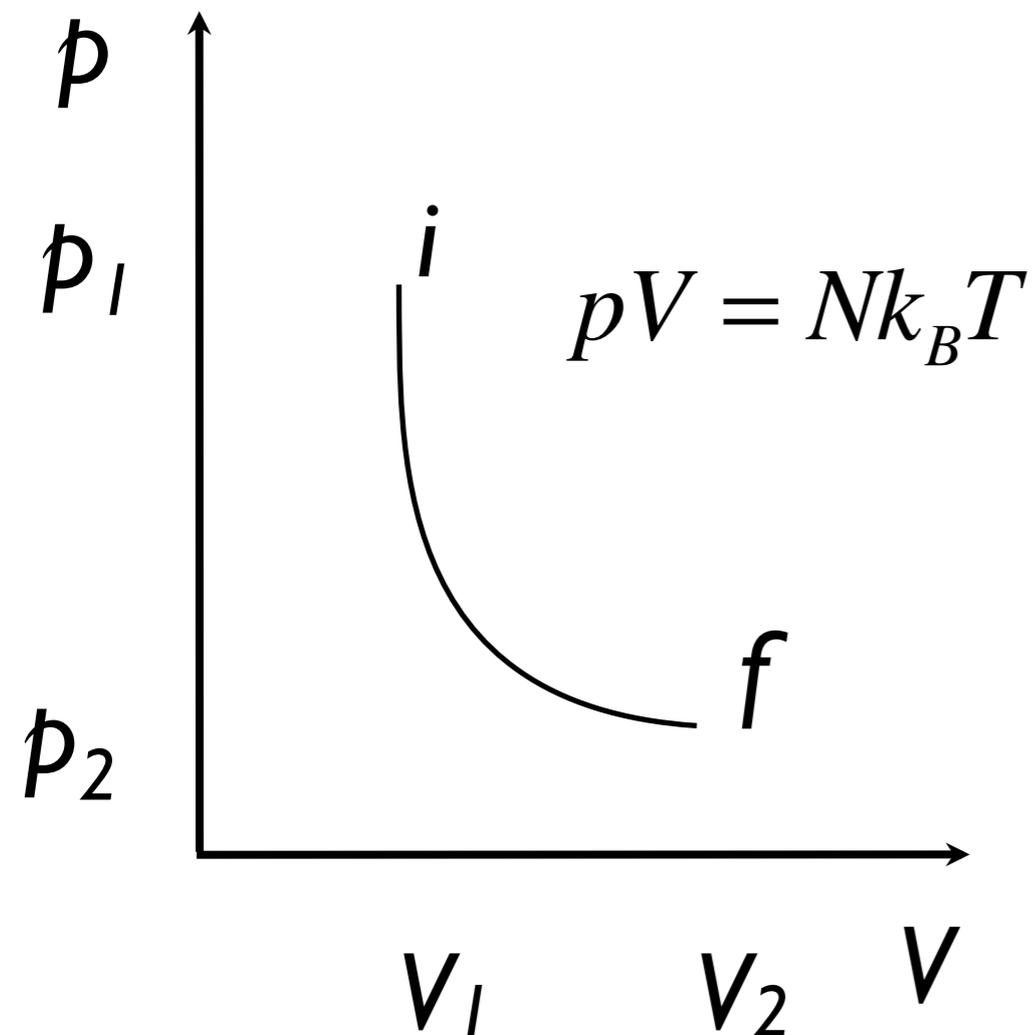
Transformation isochore  
( $V = \text{constante}$ )

$$\Delta U = \frac{3}{2} Nk_B \Delta T$$

$$W = 0$$

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} Nk_B \Delta T$$

# Transformation isotherme



Transformation isotherme  
( $T = \text{constante}$ )

$$\Delta U = 0$$

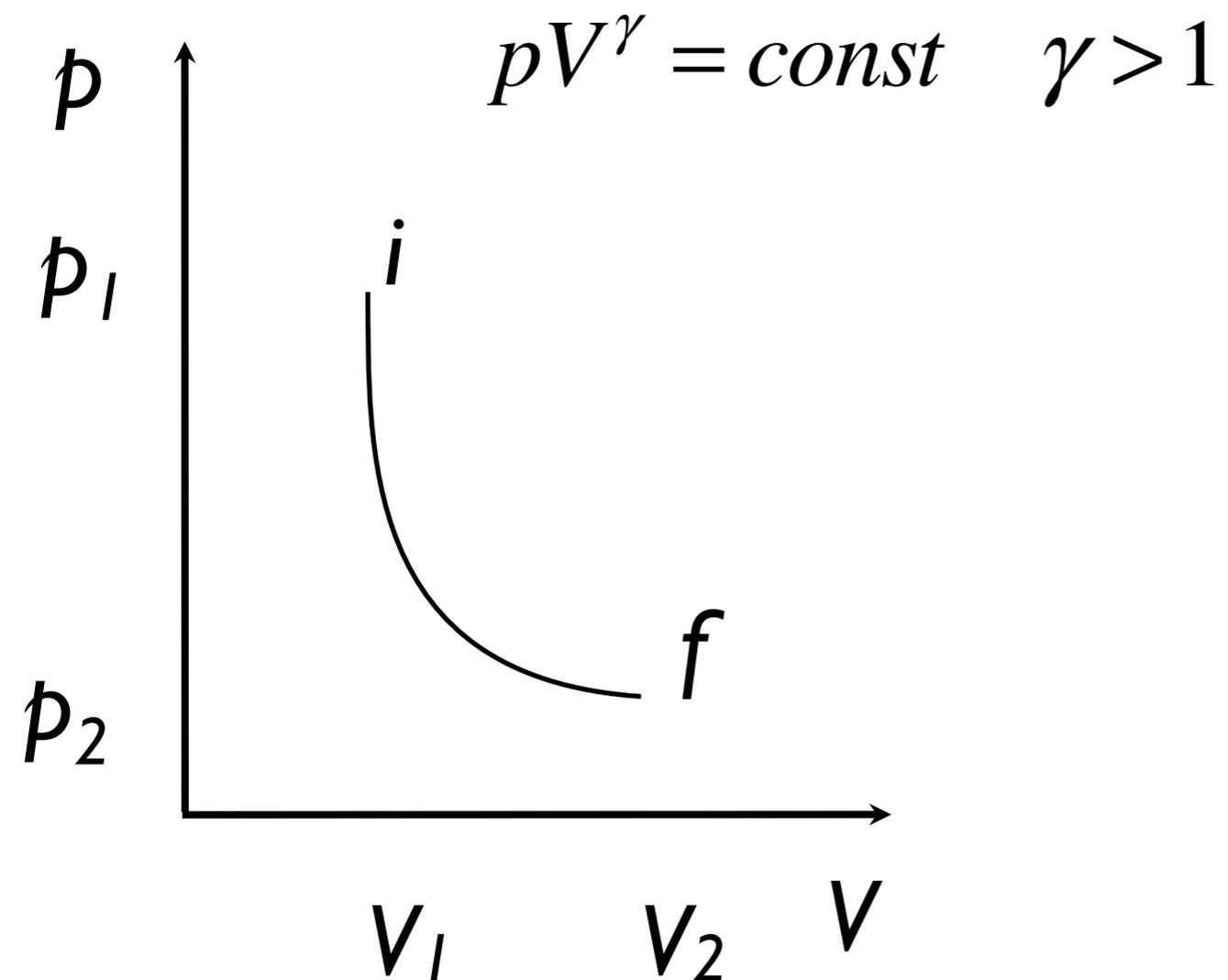
$$dW = p(V) \cdot dV$$

$$p(V) = Nk_B T / V$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV = Nk_B T \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$Q = W$$

# Transformation adiabatique



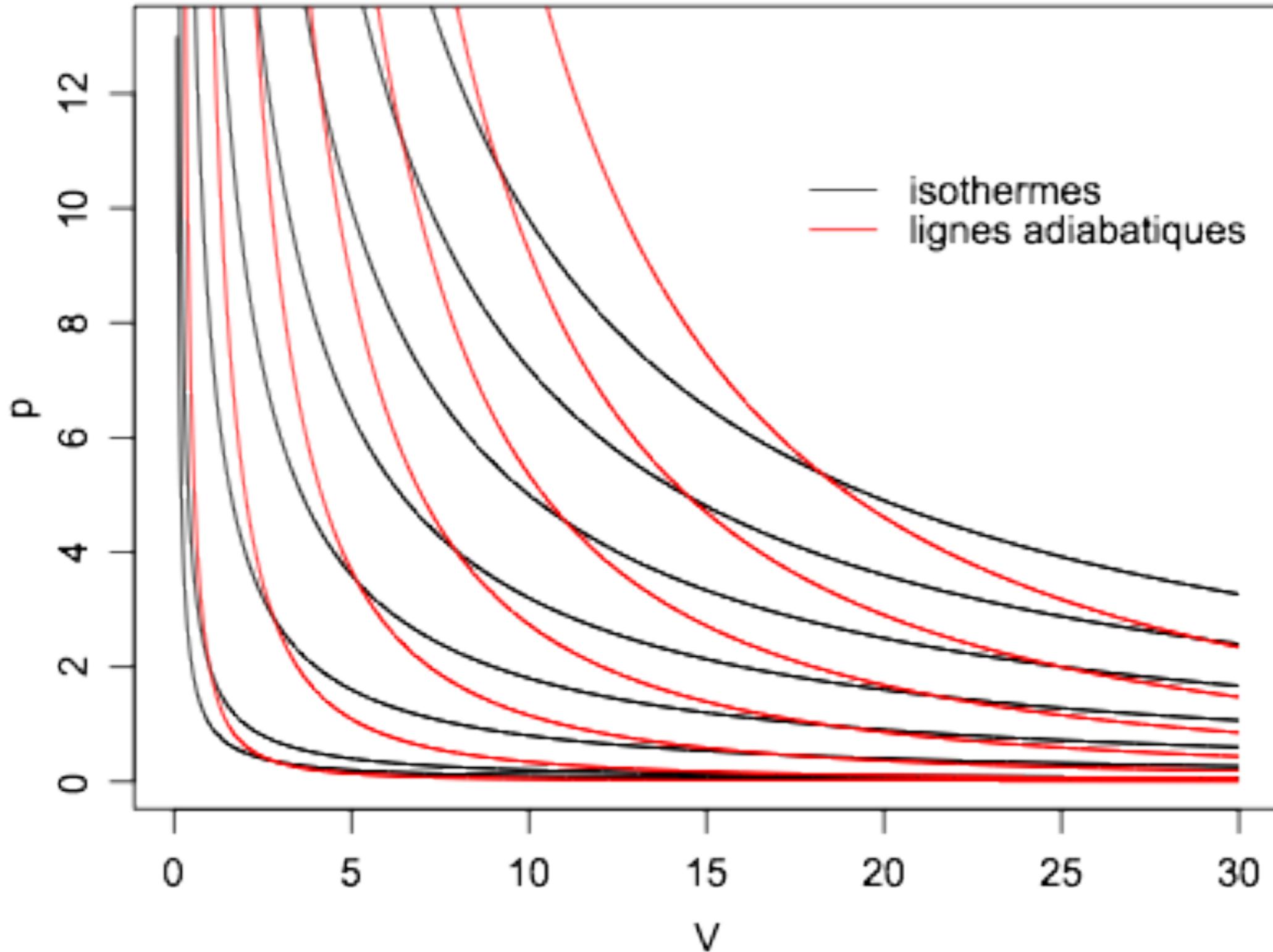
$$\Delta U = \frac{3}{2} N k_B \Delta T$$

$$W = -\Delta U$$

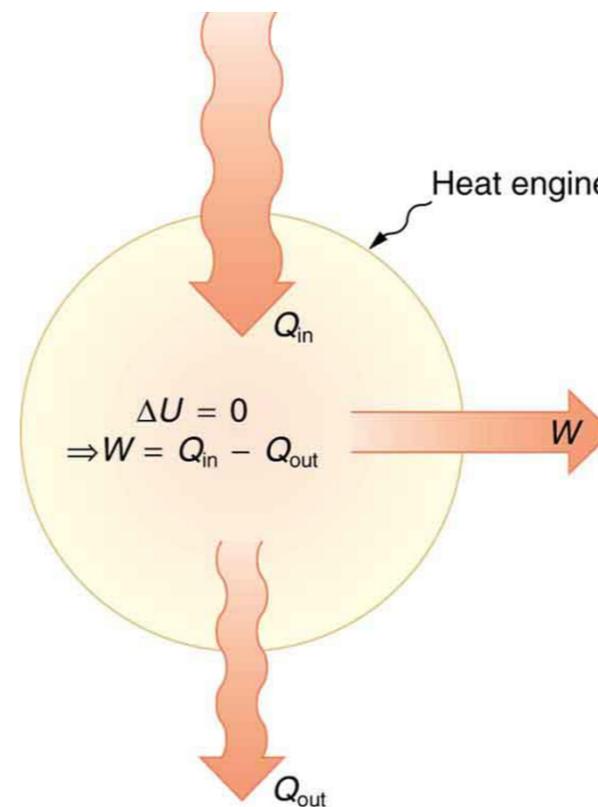
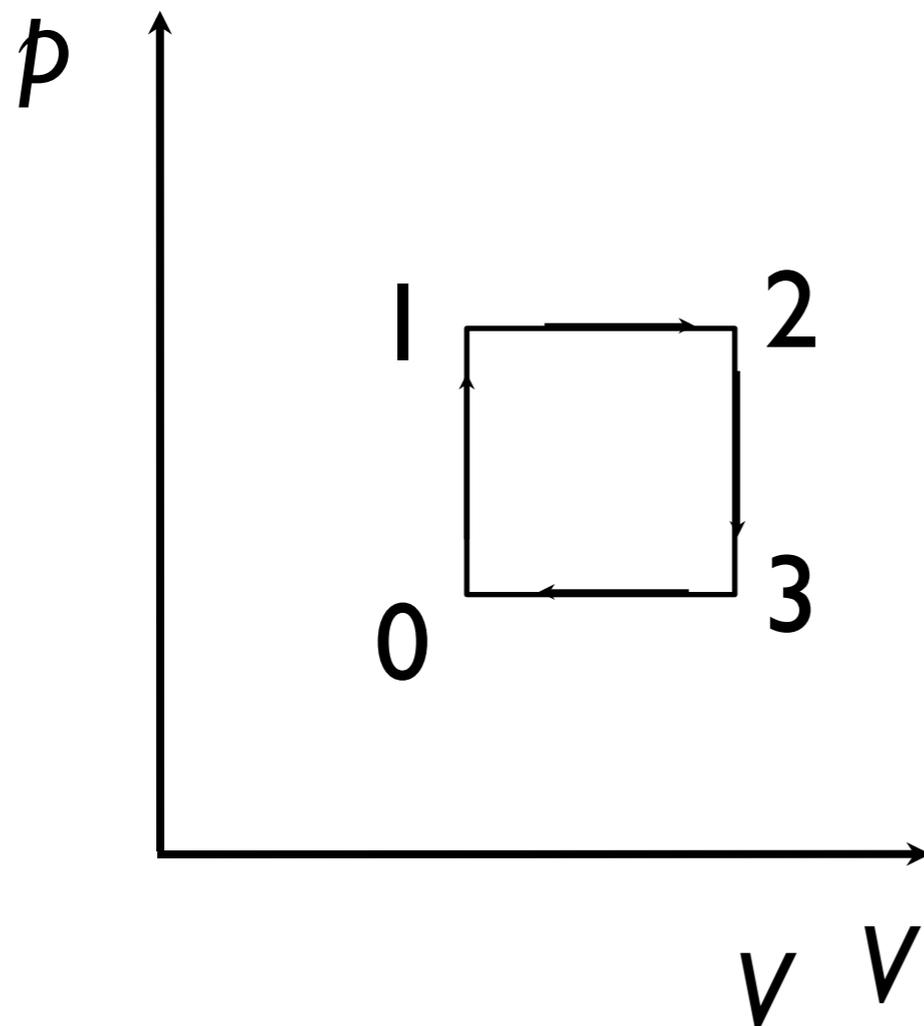
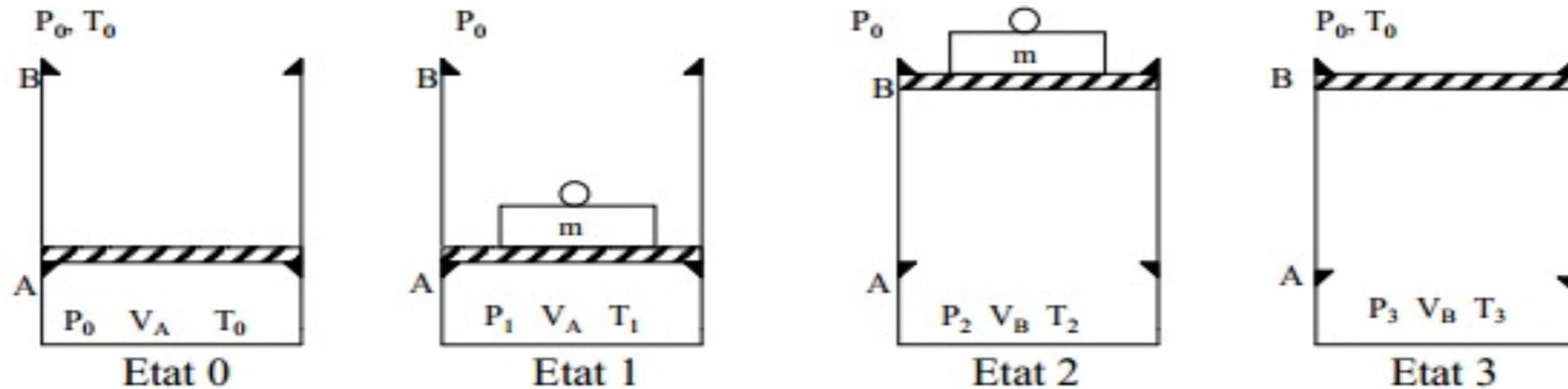
$$Q = 0$$

# Transformation adiabatique

gaz parfait



# Machine thermique



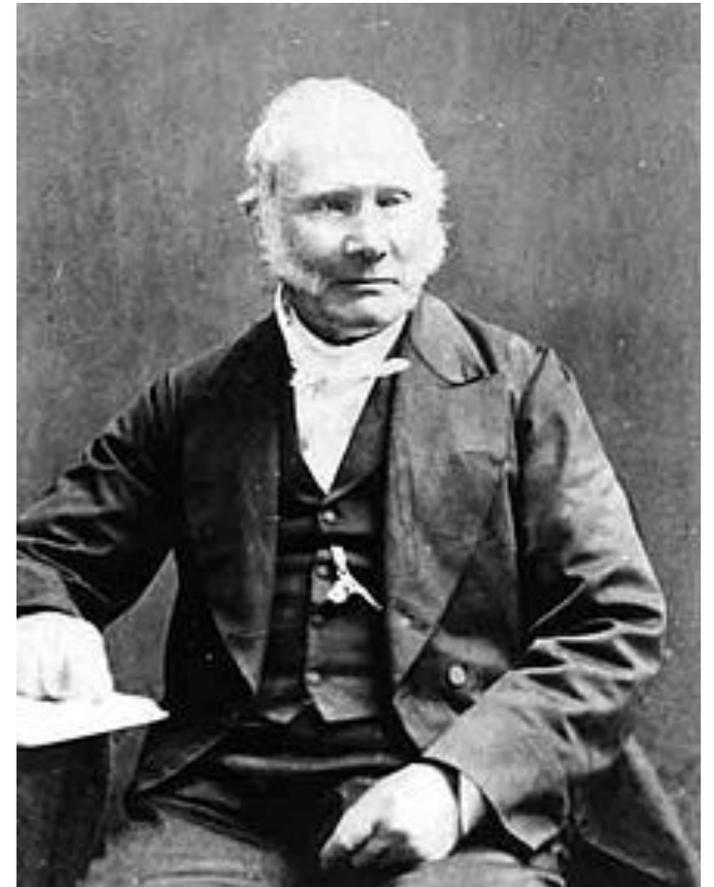
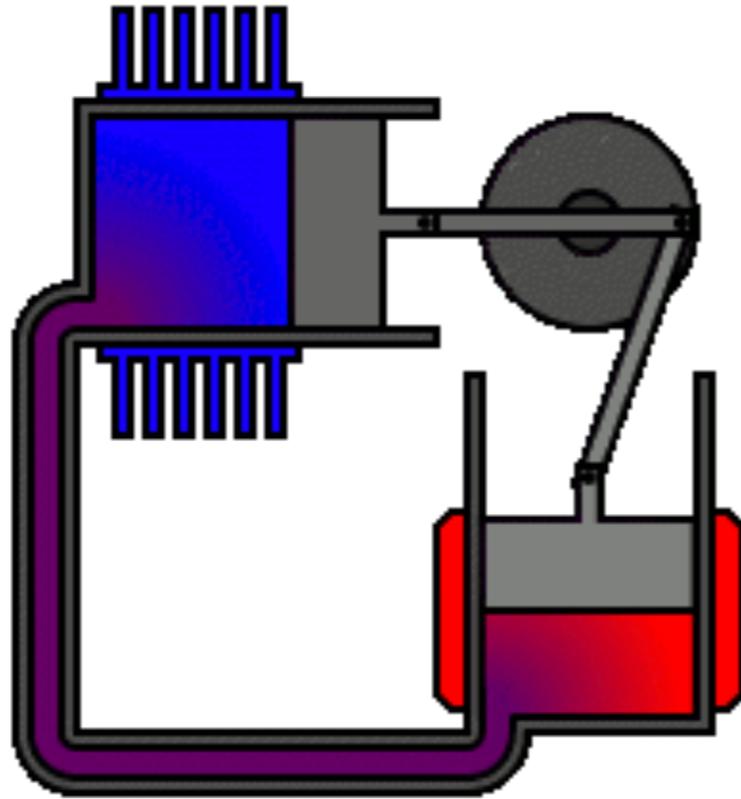
$$\Delta U = 0$$

$$Q_{tot} = W$$

# Machine de Stirling

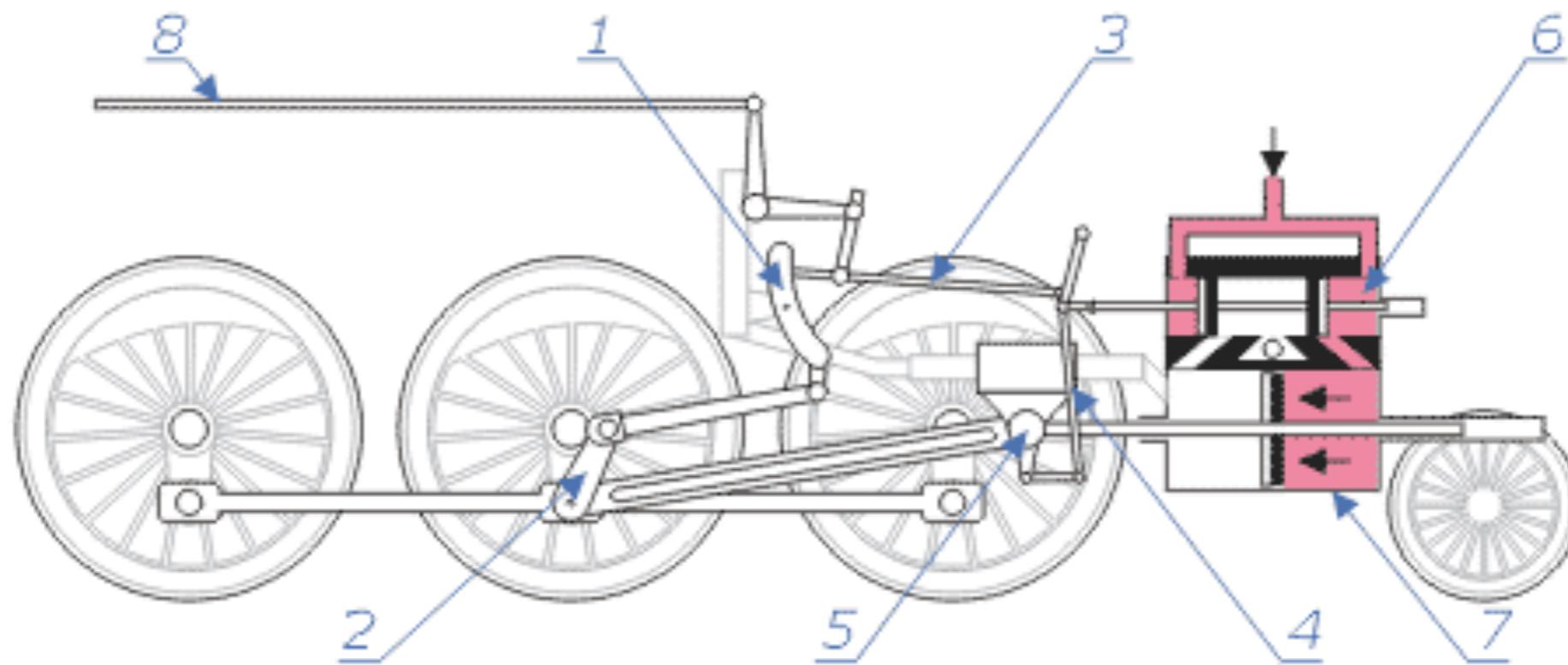


# Machine de Stirling

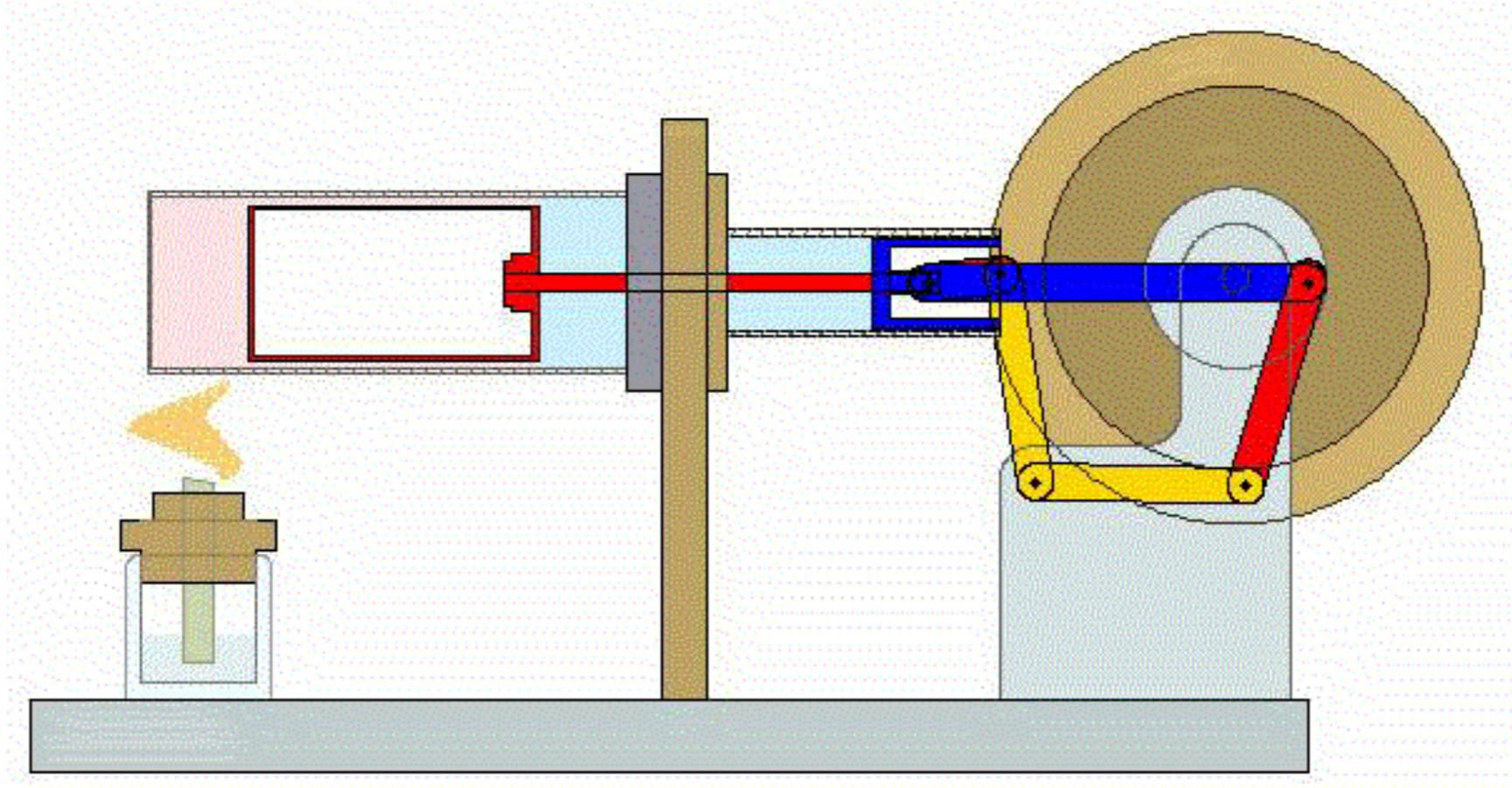


**Robert Stirling**  
(25.10.1790 - 6.6.1878)  
l'inventeur du  
« moteur à air  
chaud » (1816)

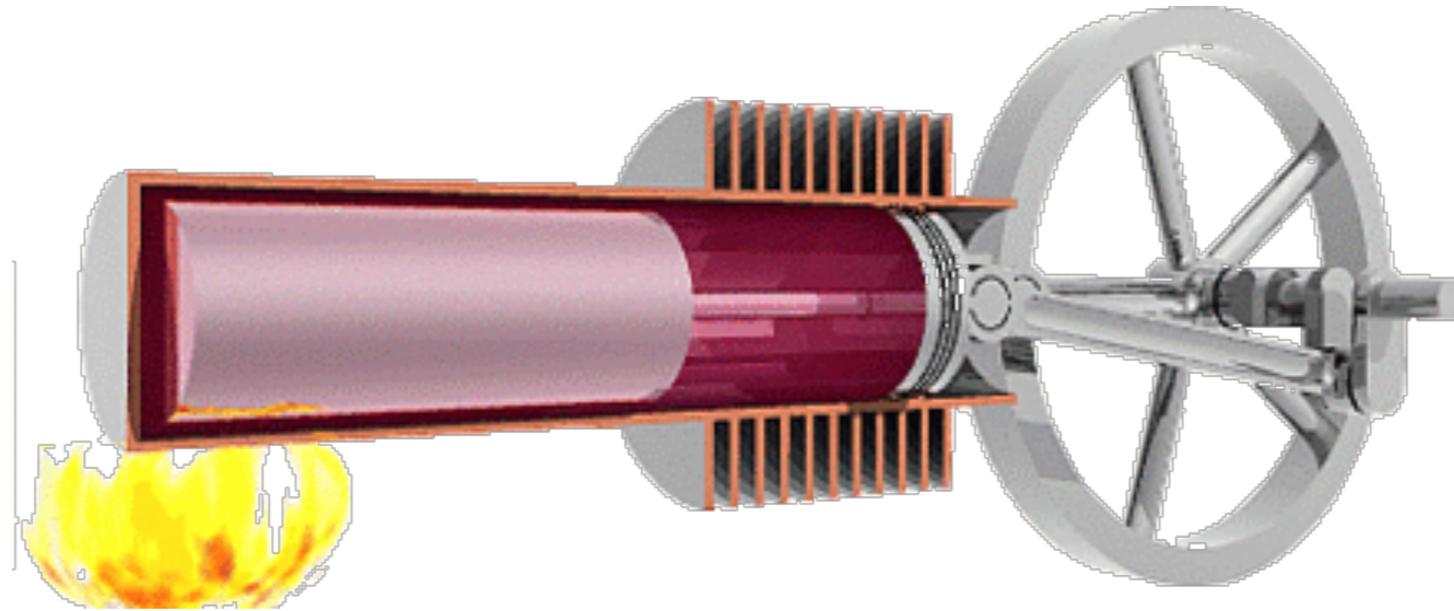
# Machine à vapeur



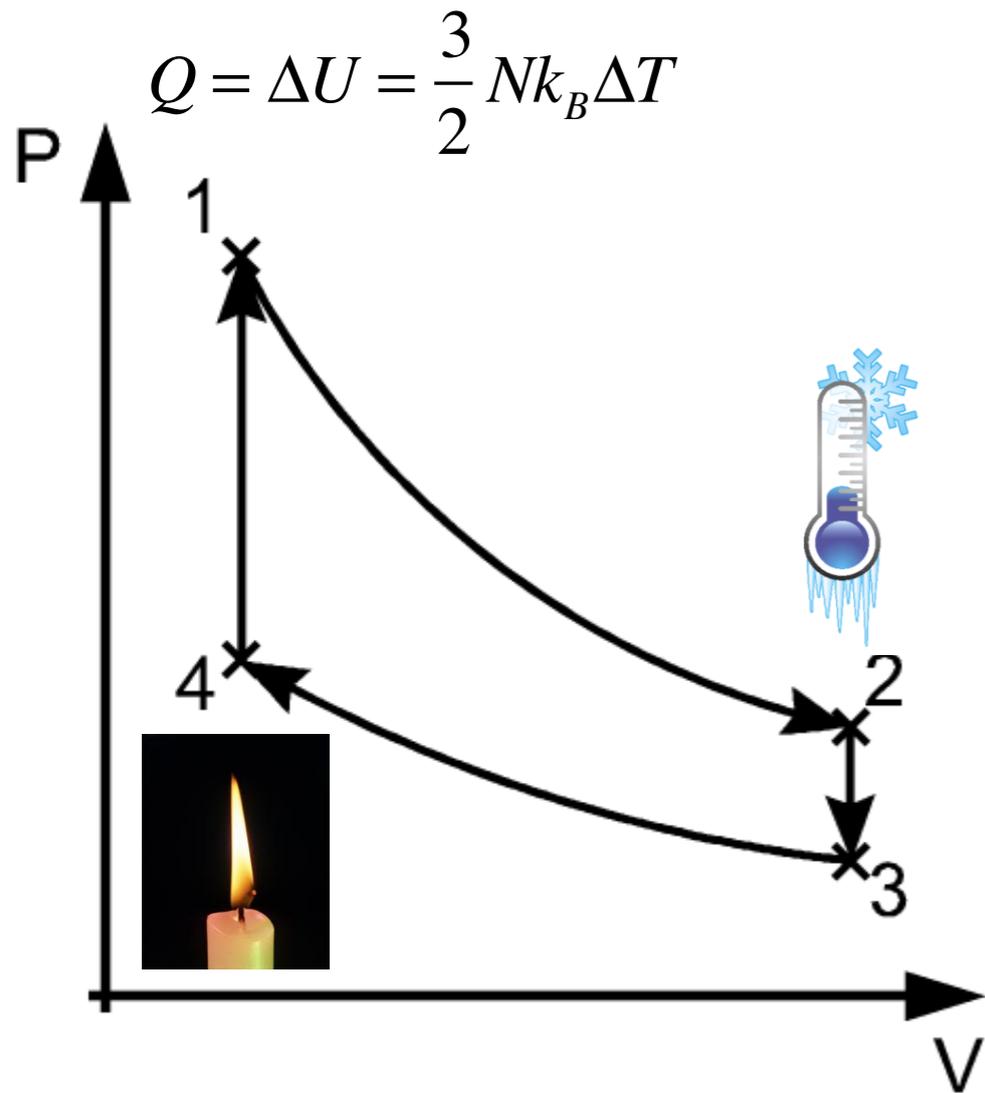
# Machine de Stirling



# Machine de Stirling



# Machine de Stirling

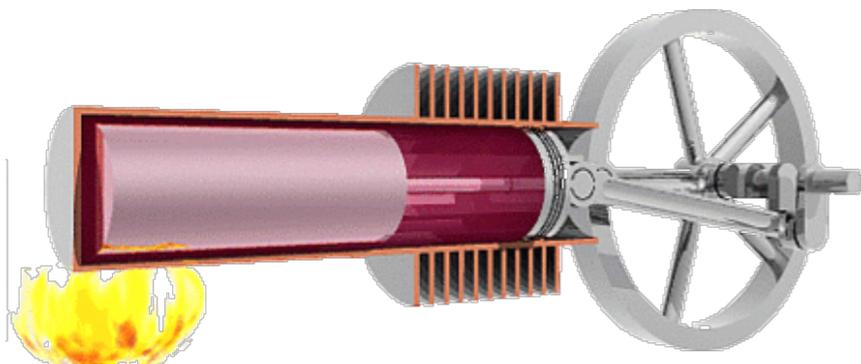


**Points 4 à 1, chauffage isochore.** Le gaz circule dans le régénérateur et prélève de la chaleur.

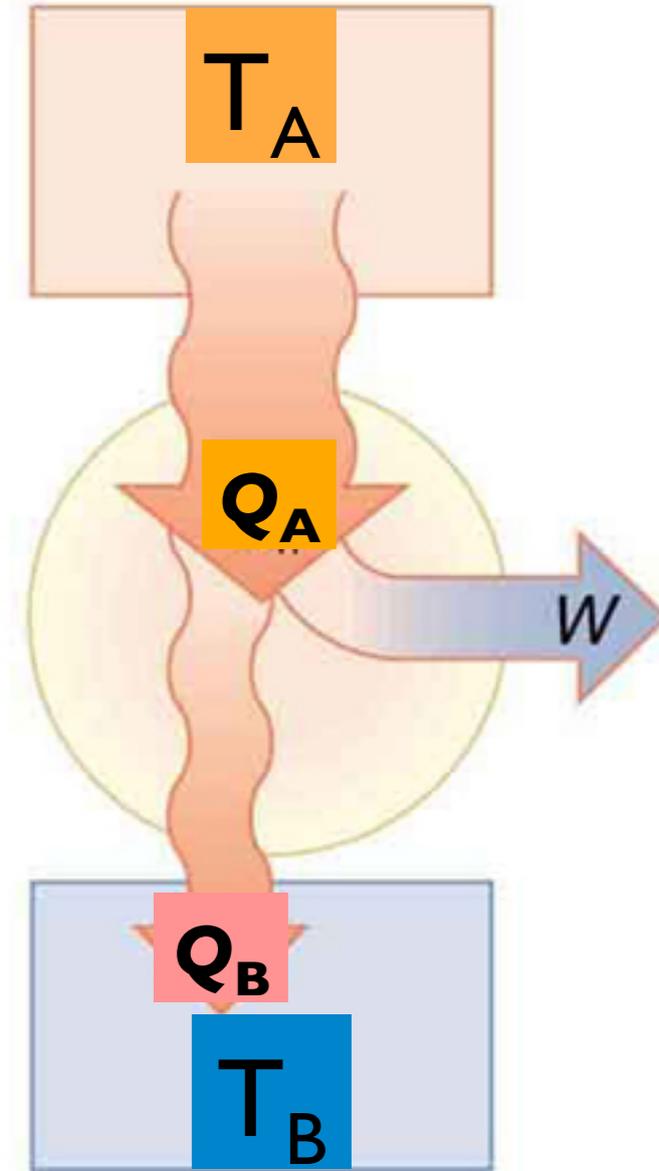
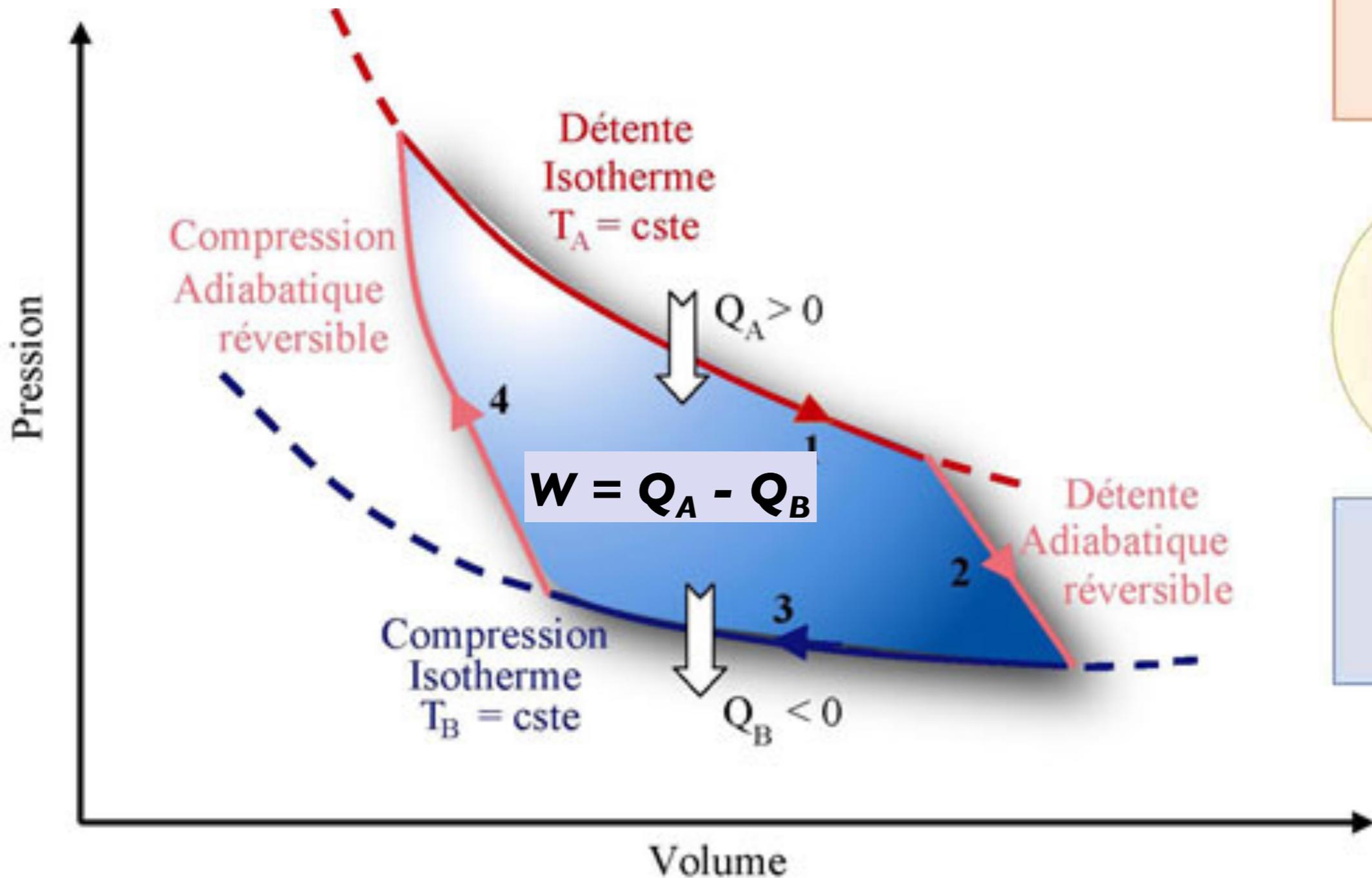
**Points 1 à 2, détente isotherme.** La zone de détente est chauffée par l'extérieur, ainsi le gaz suit une détente isotherme.

**Points 2 à 3, refroidissement à volume constant: détente isochore.** Le gaz passe dans le régénérateur, se refroidit en lui transférant sa chaleur - qui sera ensuite utilisée pour le cycle suivant.

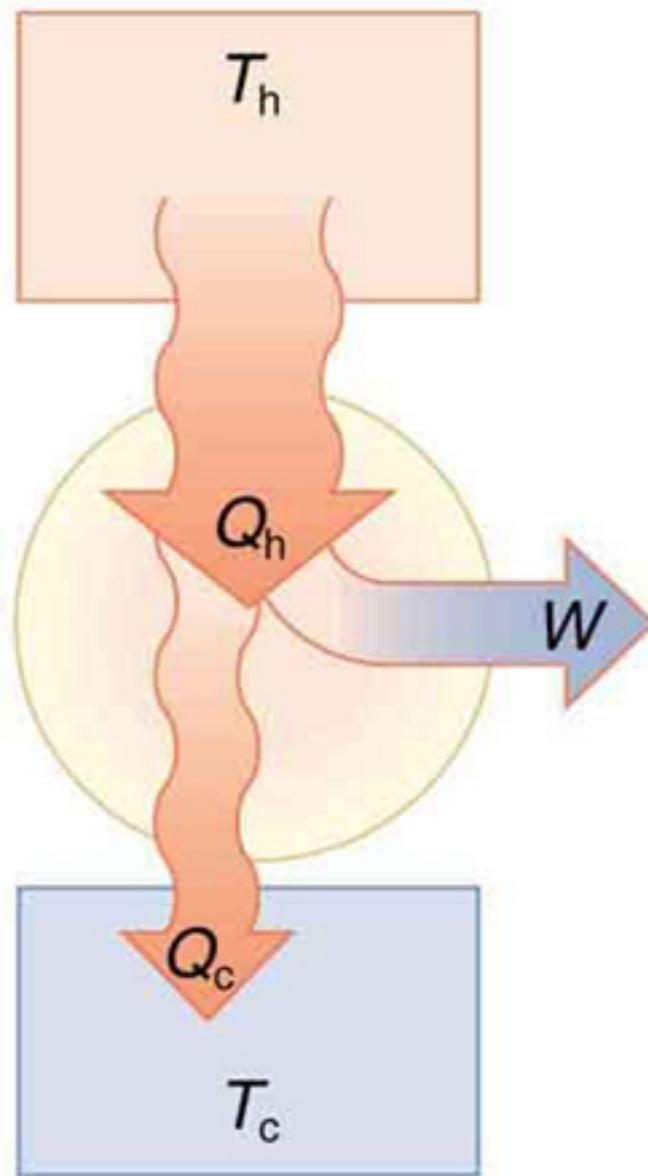
**Points 3 à 4, compression isotherme.** La zone de compression est refroidie, ainsi le gaz suit une compression isotherme.



# Cycle de Carnot



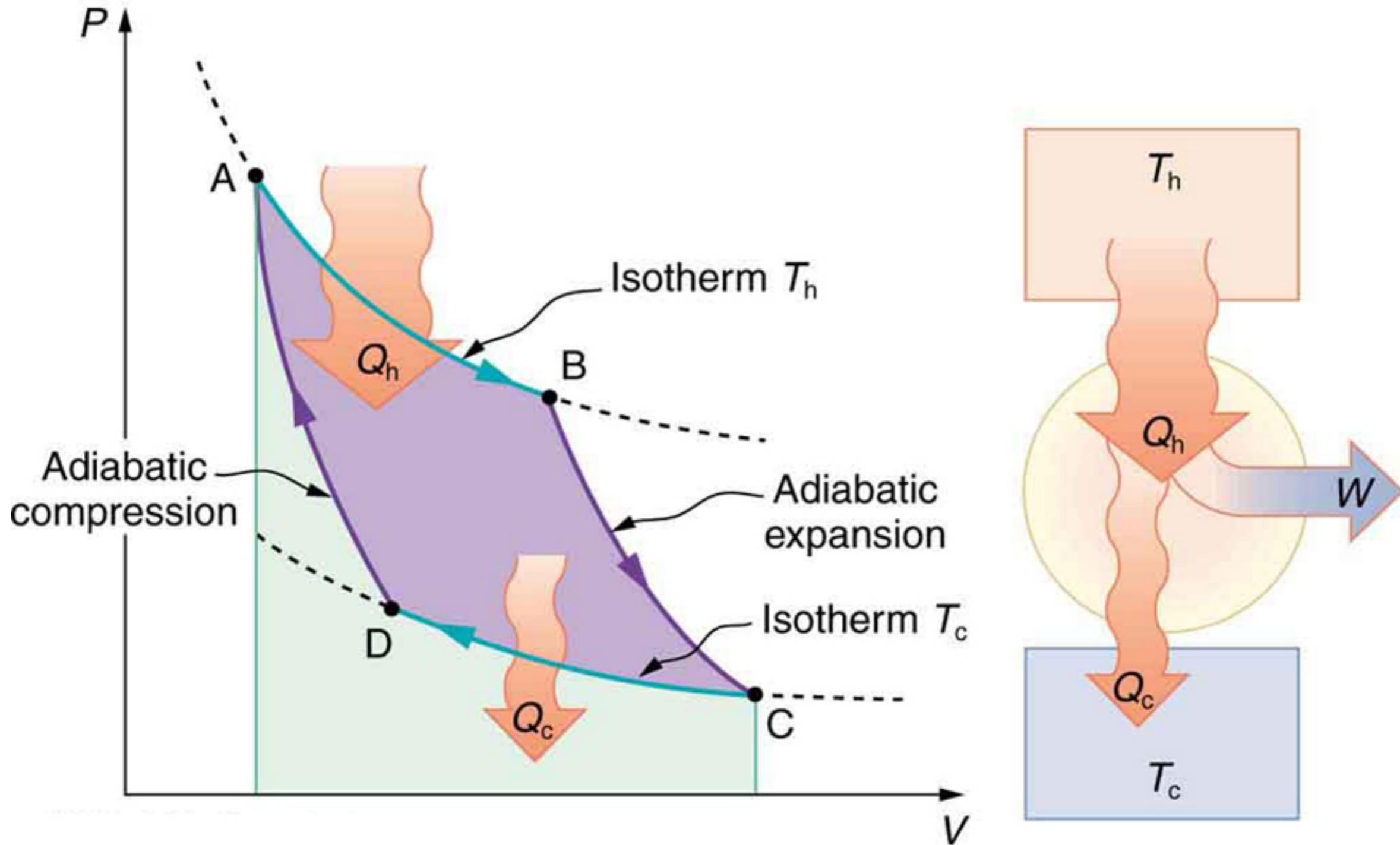
# Machine de Carnot



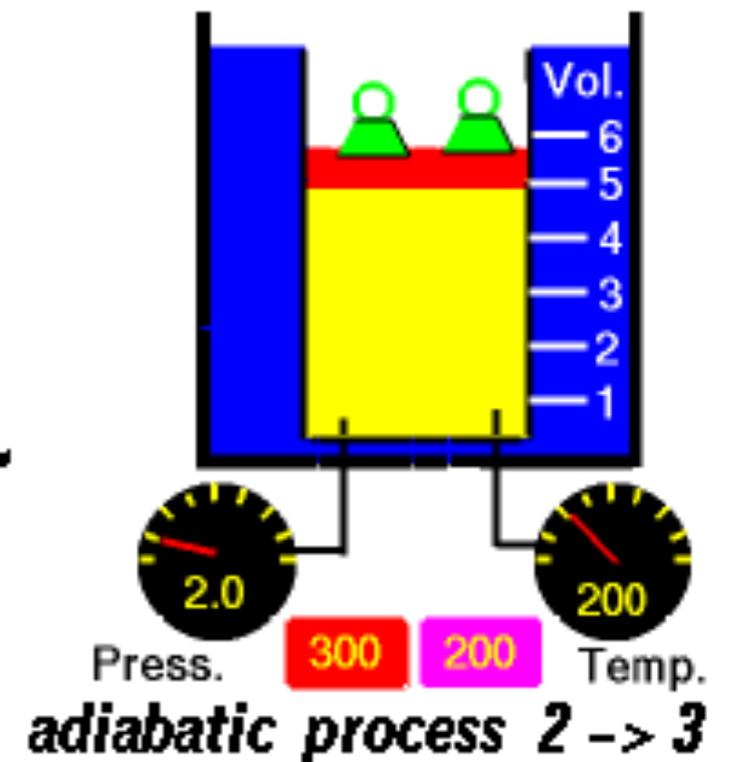
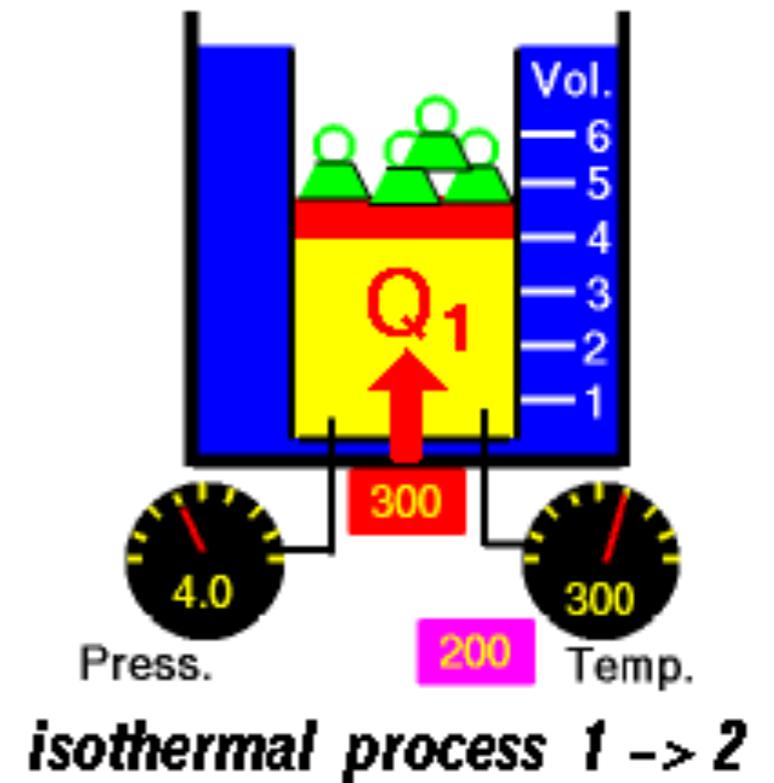
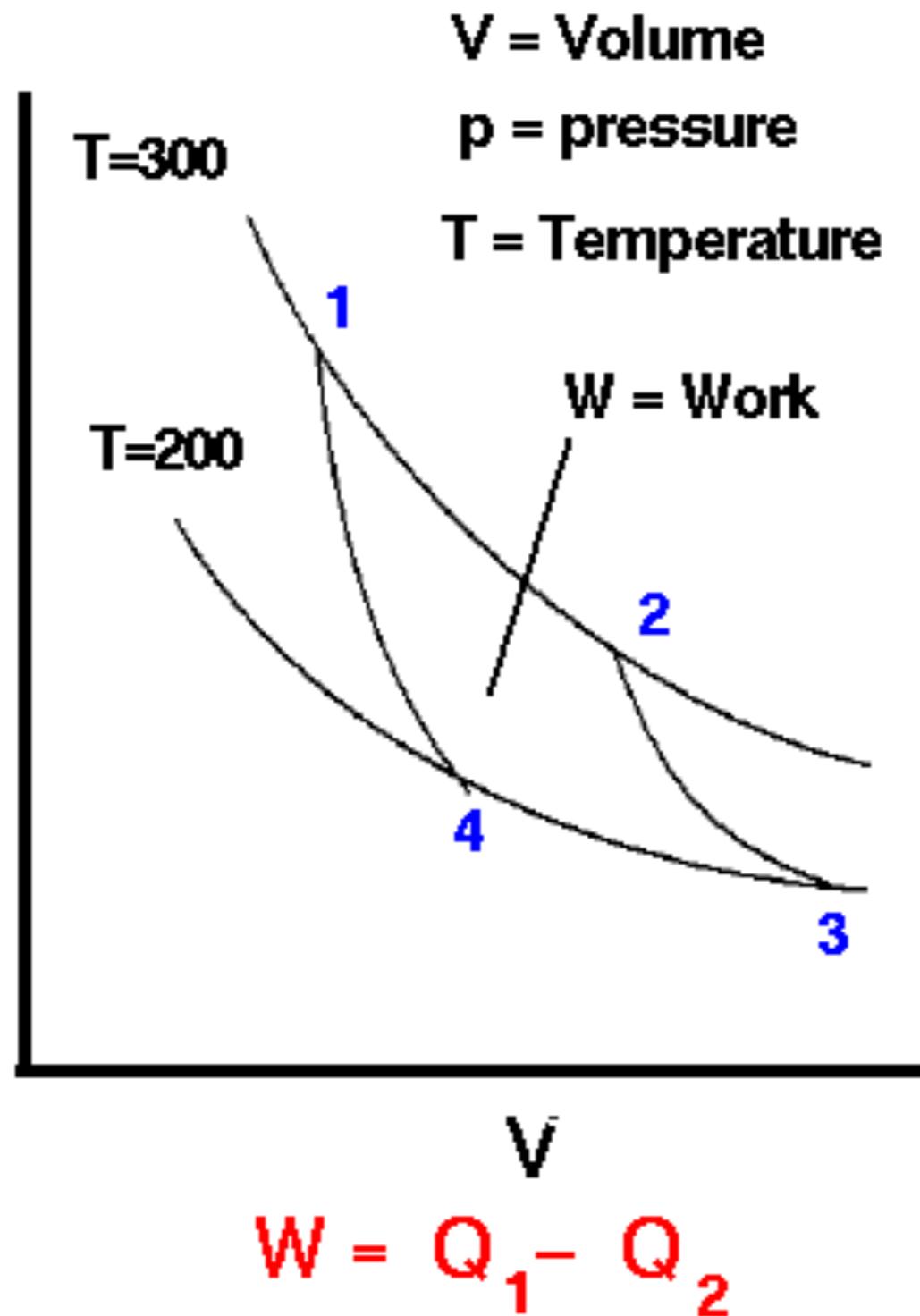
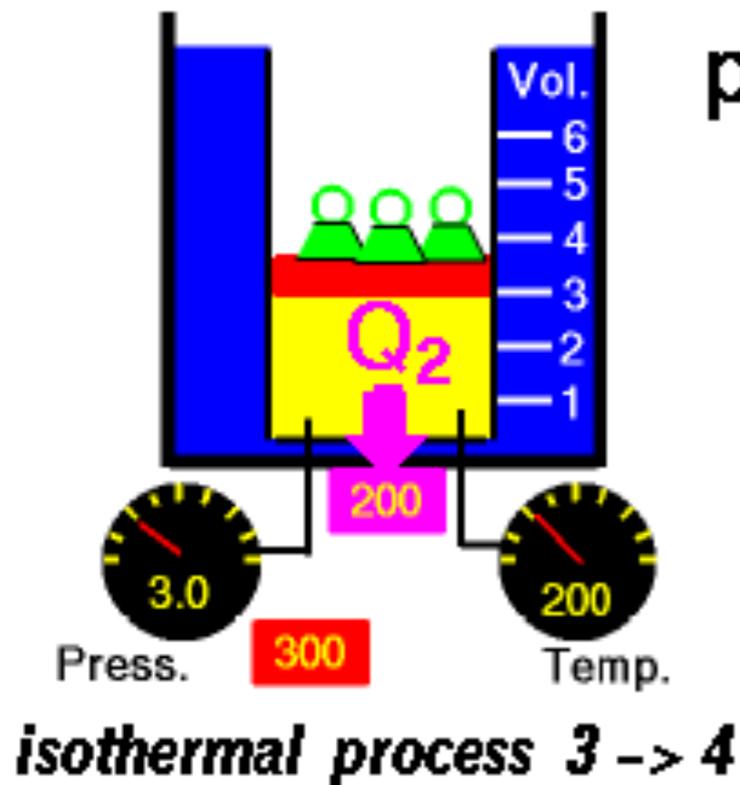
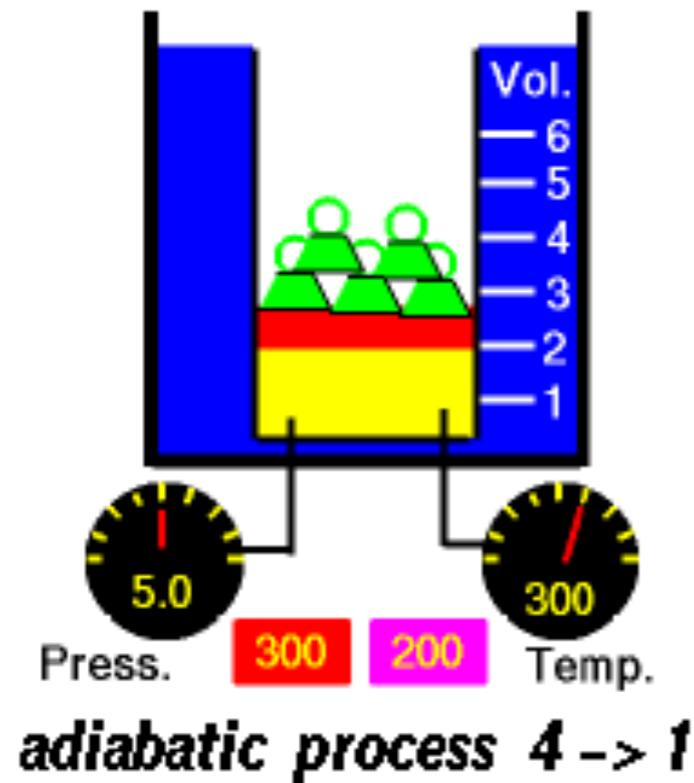
$$W = Q_H - Q_C$$

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

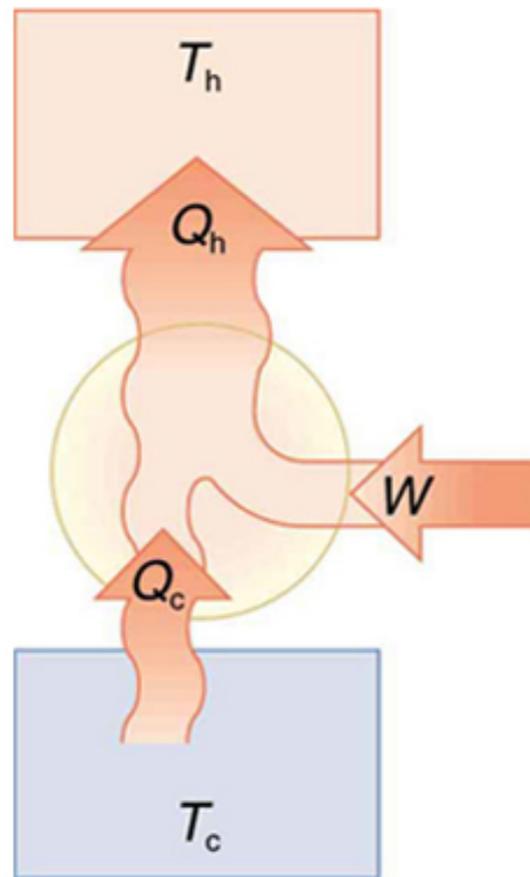
# Cycle de Carnot



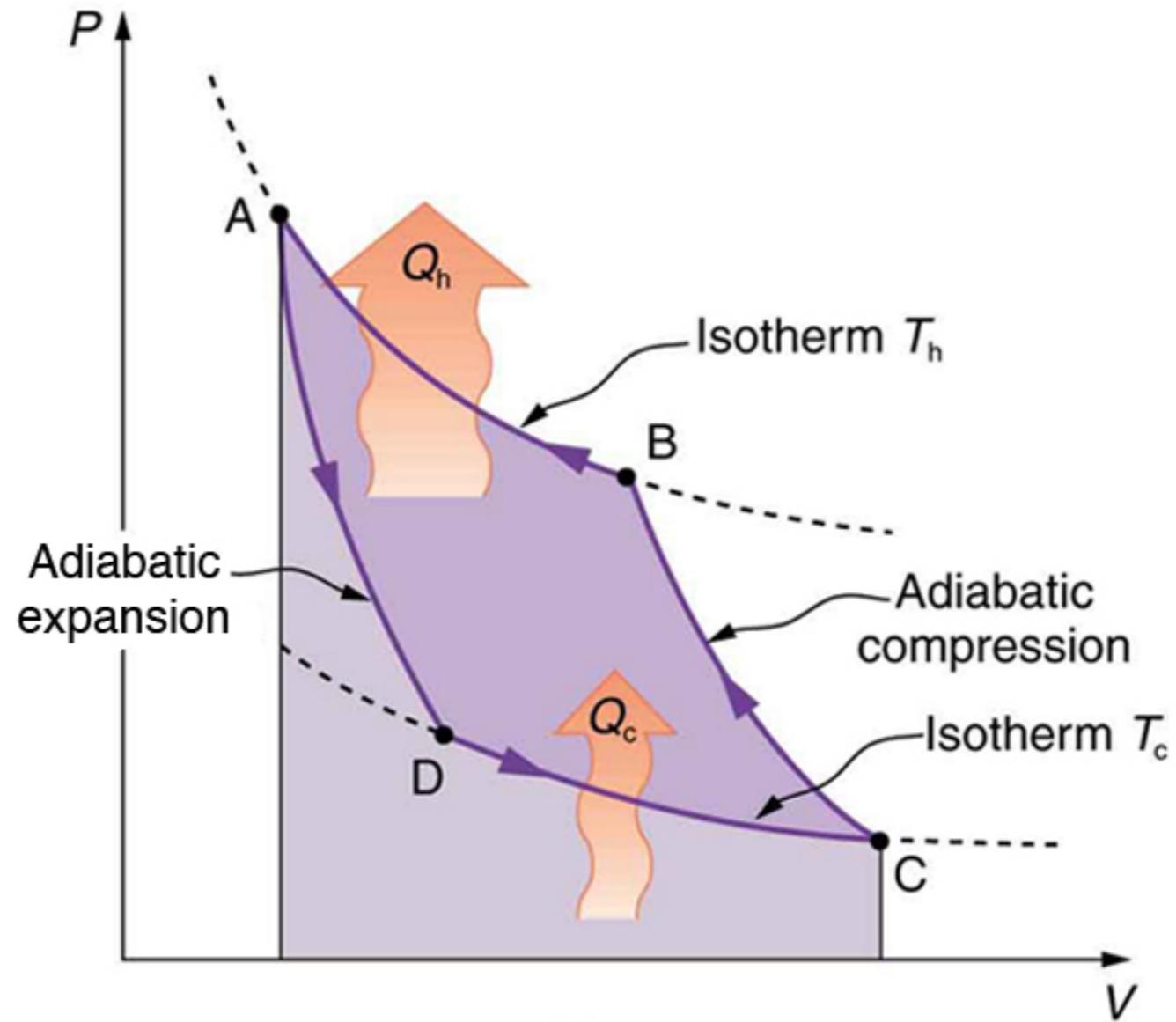
# Machine de Carnot



# Pompe à chaleur

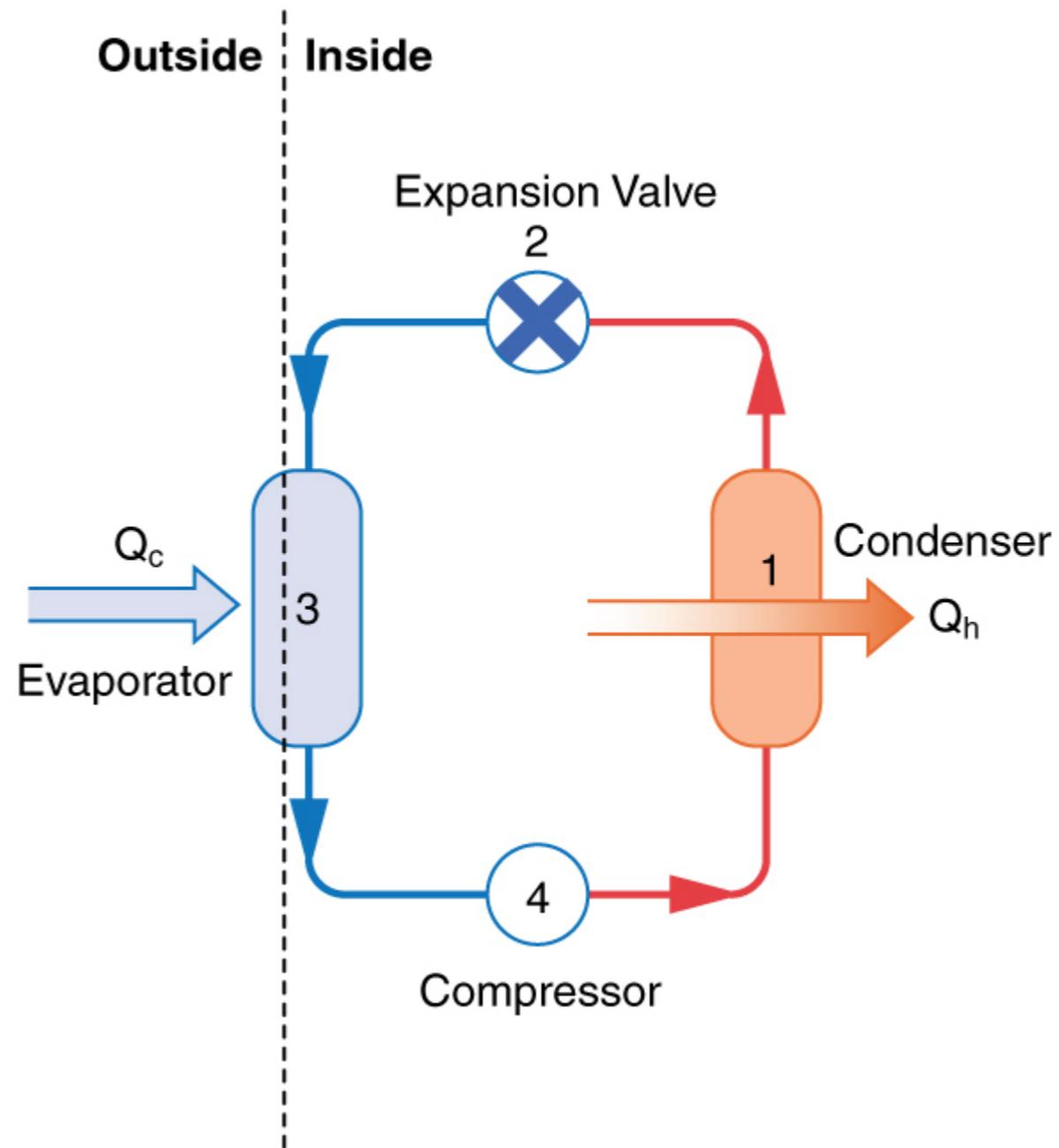


(a)

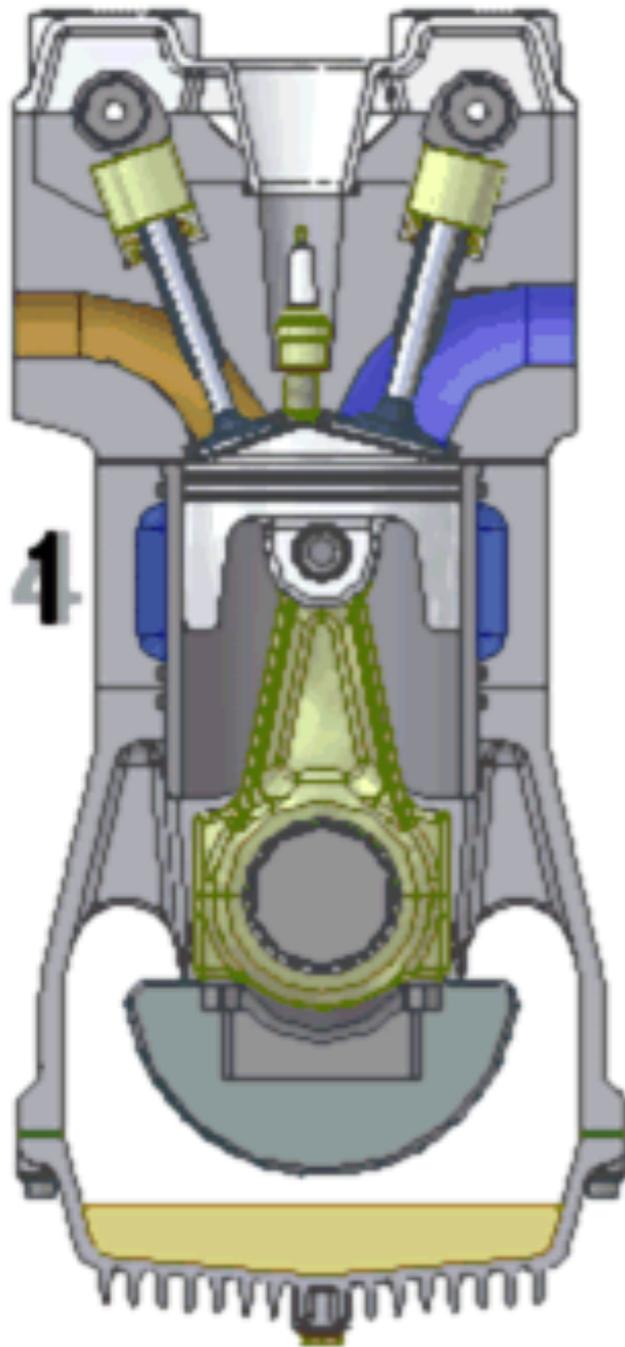


(b)

# Réfrigérateur



# Moteur à quatre temps à allumage commandé



1: admission

2: compression

3: combustion

4: échappement

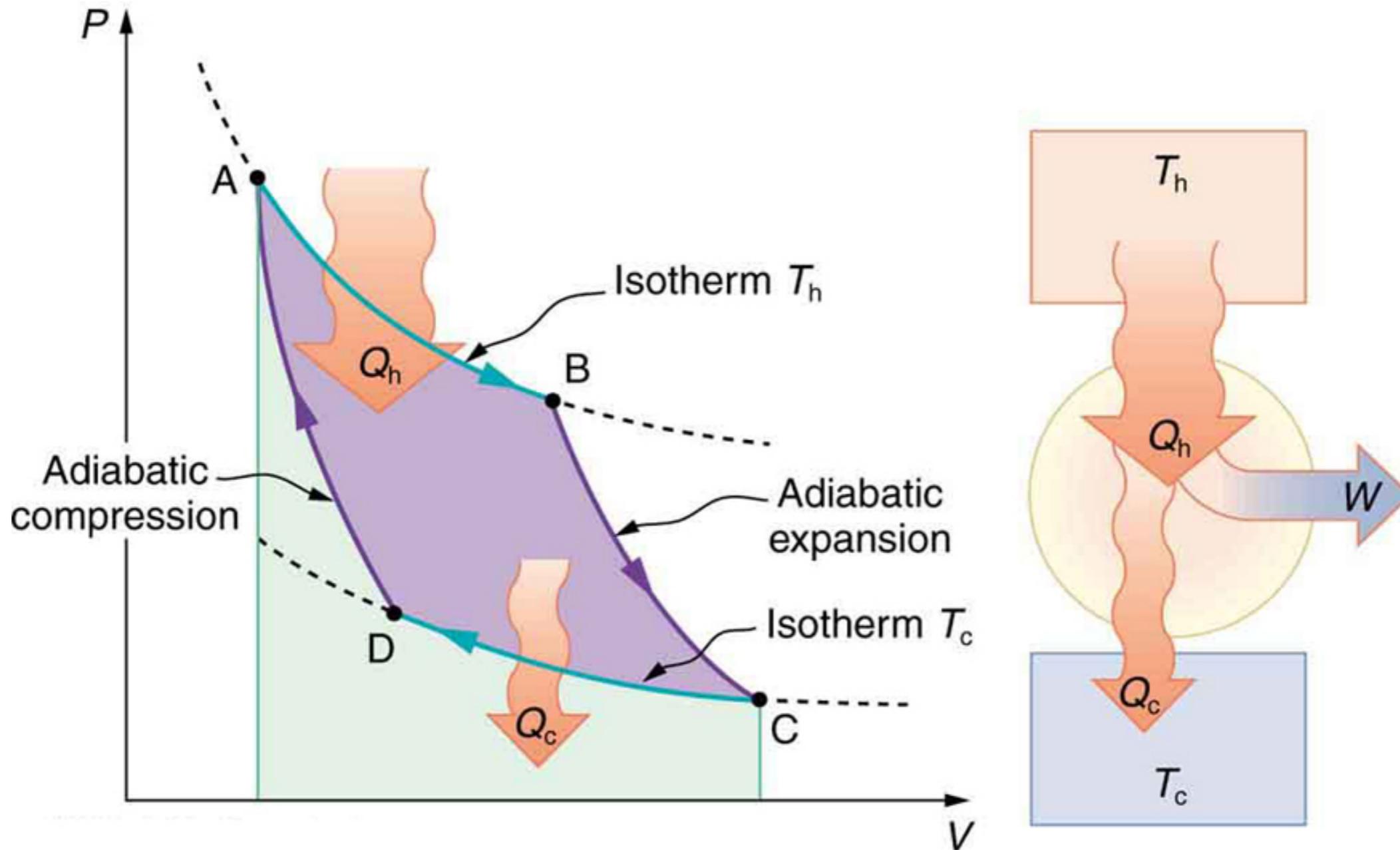


**Nicolaus Otto**  
(14.6.1832 – 28.1.1891)

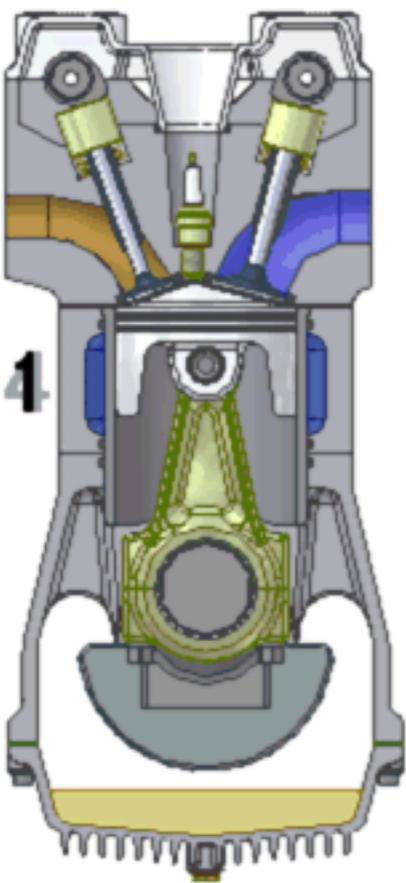


1872 –production des  
premières moteurs  
à quatre temps

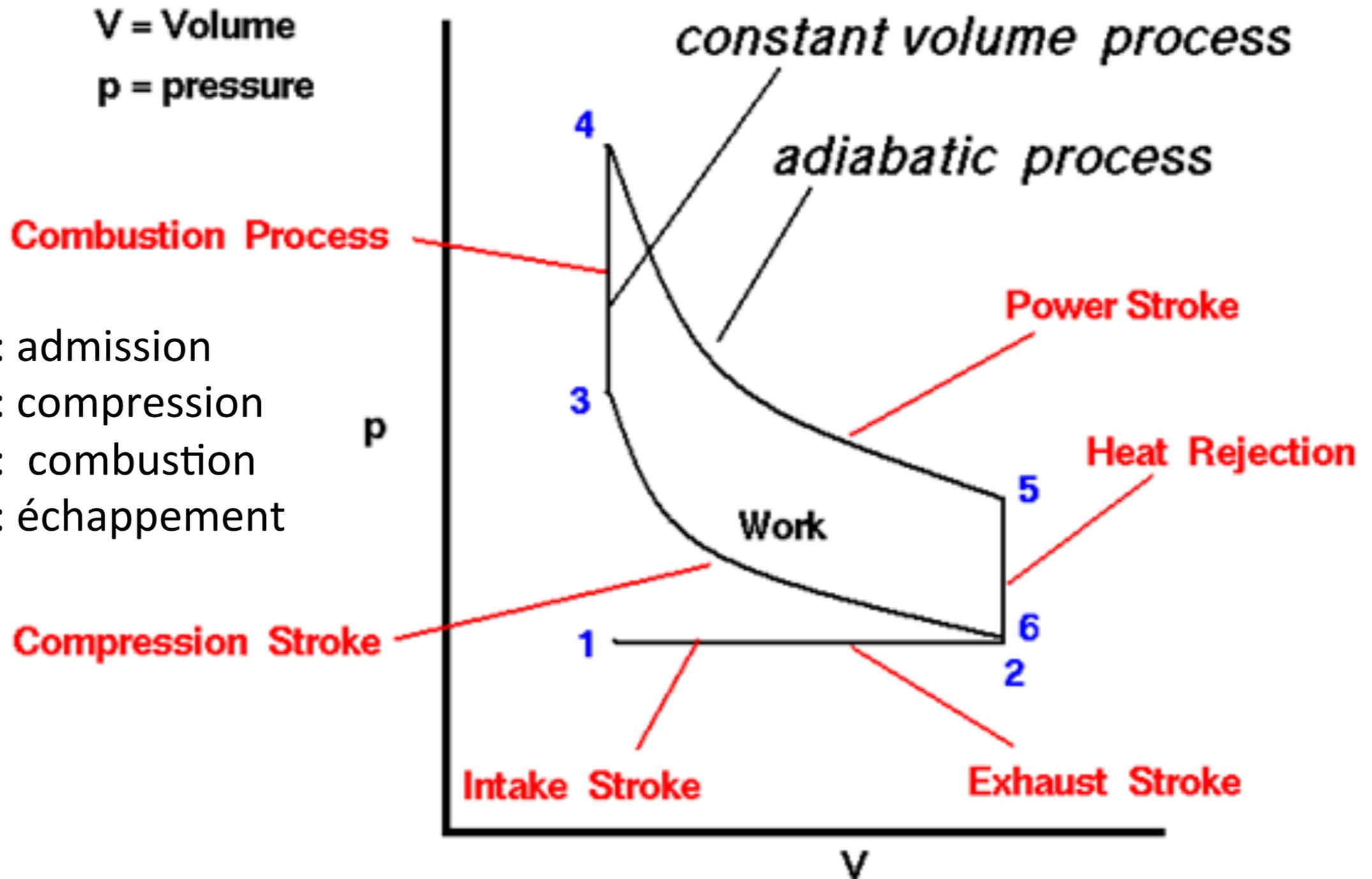
# Moteur à quatre temps à allumage commandé



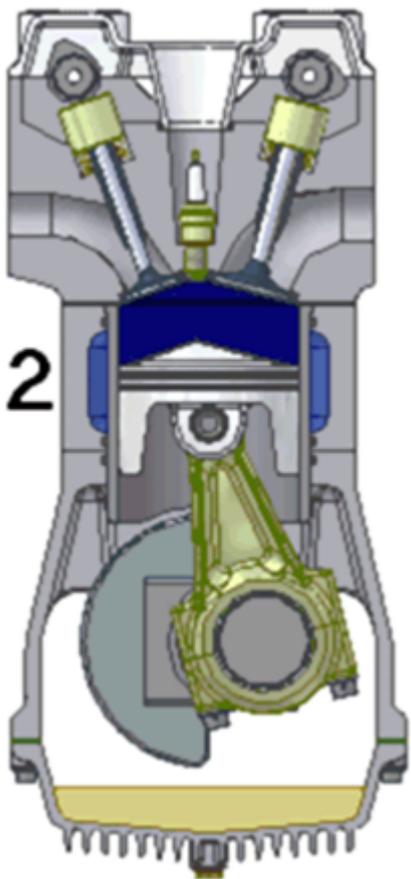
# Moteur à quatre temps à allumage commandé



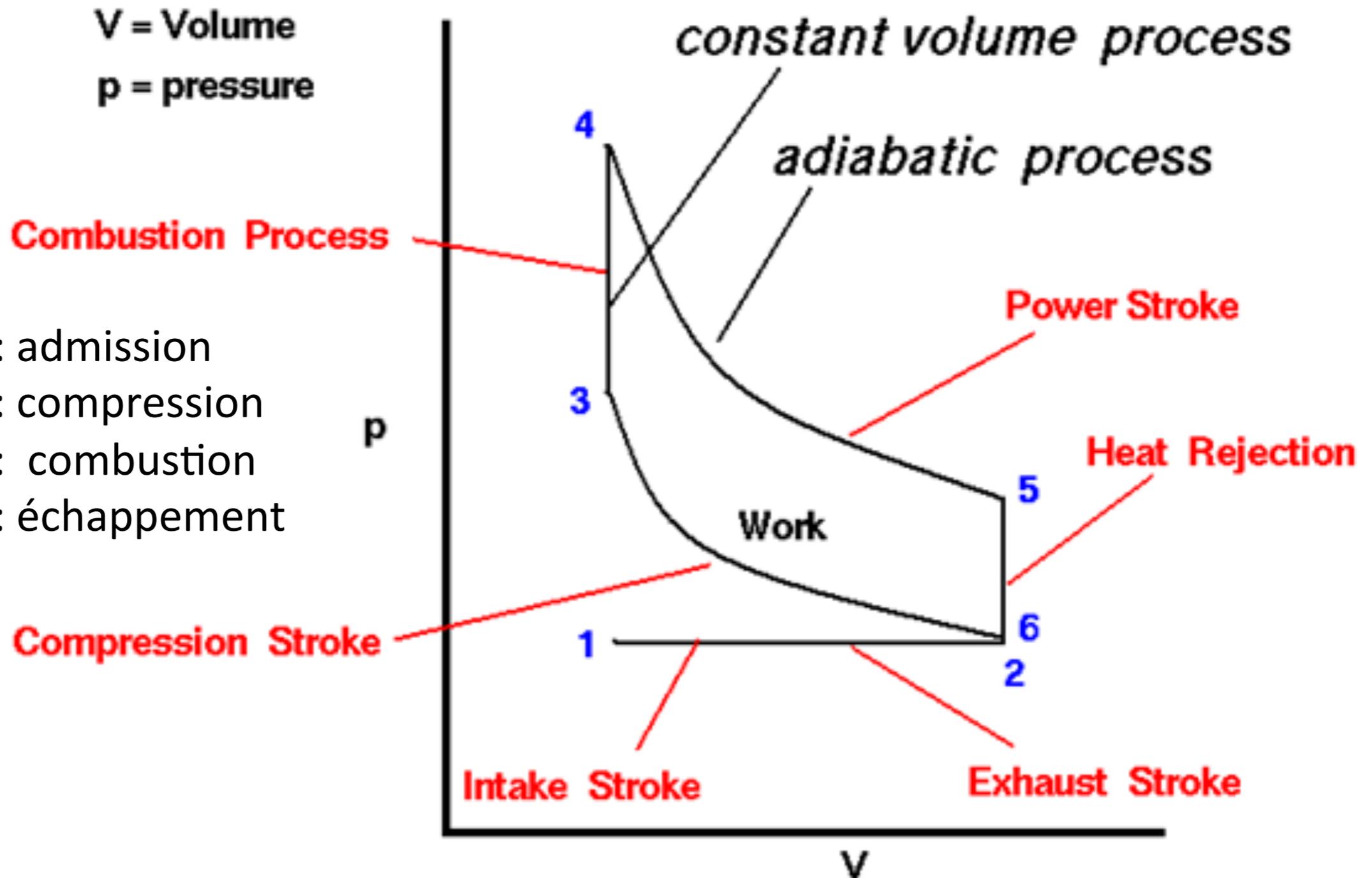
- 1: admission
- 2: compression
- 3: combustion
- 4: échappement



# Moteur à quatre temps à allumage commandé



- 1: admission
- 2: compression
- 3: combustion
- 4: échappement



# Le cycle et la machine de Carnot

