

# Les cycles thermodynamiques : échange de chaleur et de travail dans les machines

# 1) Les cycles thermodynamiques

- Un cycle thermodynamique est une suite de transformations sur un système fermé qui le ramène à son état initial.
- Un système mono-constituant subissant une évolution cyclique pourra être caractérisé par 2 grandeurs indépendantes :

- diagramme de Clapeyron (P, v)
- diagramme entropique (T, s)
- diagramme enthalpique (h, s)

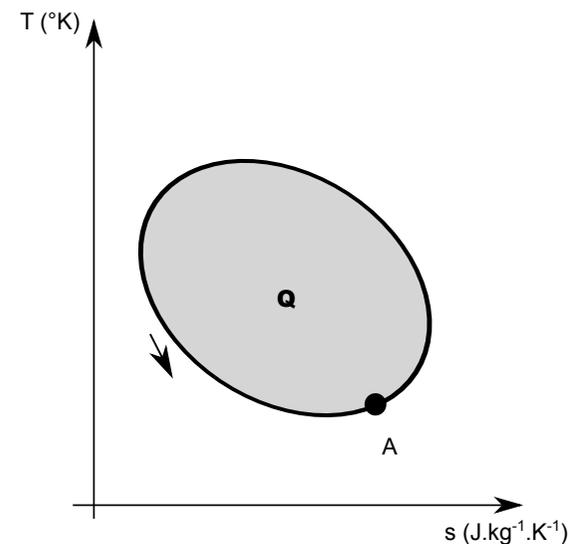
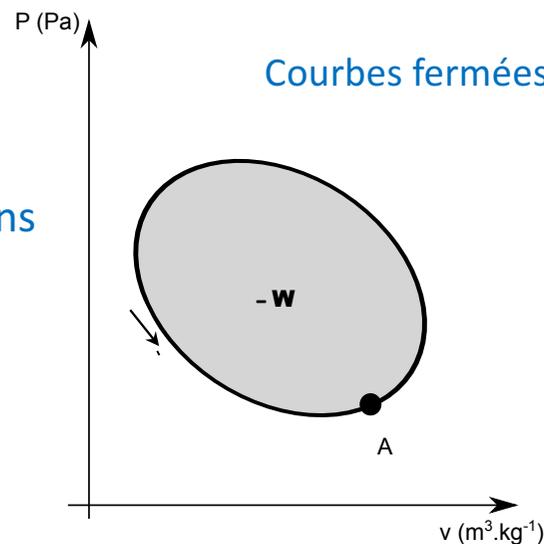
$$W + Q = 0$$

→ Cycle décrit dans le sens opposé dans (P,v) et (T,s)

$$W = -\oint P dV = -m \oint p dv$$

→ aire dans la courbe fermée

$$Q = \oint T ds = m \oint T ds$$



- Le cycle est moteur si  $W < 0$  et récepteur si  $W > 0$
- $W + Q = 0 \rightarrow$  Transformation possible de chaleur en travail

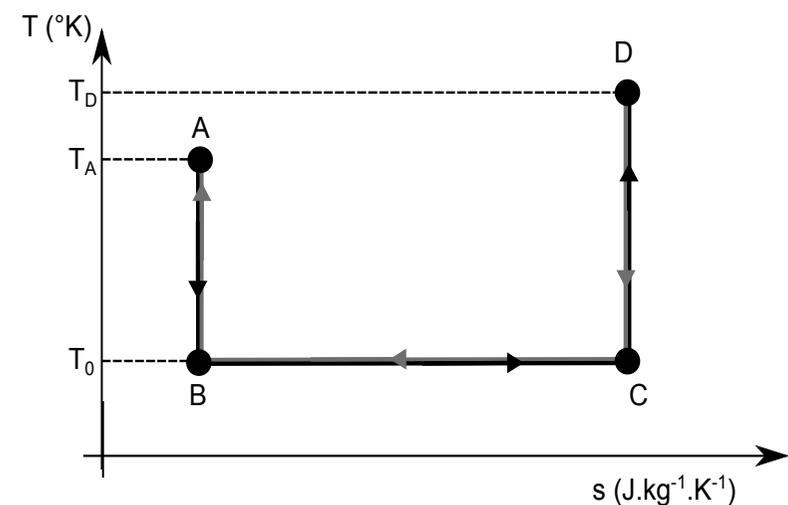
## 2) Les cycles monothermes

- Un cycle monotherme est un cycle n'échangeant de la chaleur qu'avec une seule source
- Cycle monotherme *réversible* : deux types de transformations possibles :
  - celles qui échangent de chaleur avec la source unique à la température  $T_0$  ( $B \rightarrow C$  et  $C \rightarrow B$ )
  - celles qui n'échangent pas de chaleur : adiabatique et réversibles (isentropiques) ( $A \rightarrow B$  et  $C \rightarrow D$ )
- L'aire limitée par le cycle est nécessairement nulle  $\rightarrow Q=0$  et  $W=0$
- Pour un cycle *irréversible* avec un échange de chaleur  $Q$ , on a  $\Delta S = \oint dS = 0$

$$\Delta S = \Delta S_i + \frac{Q}{T_0}$$

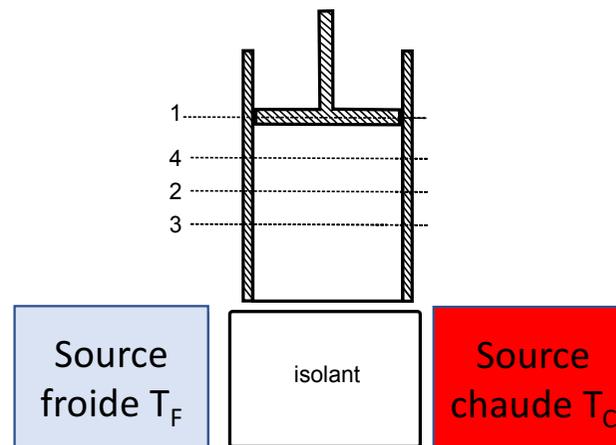
$> 0$   $Q < 0$

- Un cycle monotherme irréversible est nécessairement récepteur ( $W > 0$ )



### 3) Les cycles dithermes : cycles de Carnot

- Pour effectuer la transformation de chaleur en travail il faut nécessairement deux sources à températures différentes
- Machine thermique selon Carnot : cylindre aux parois latérales adiabatiques, dont le fond peut être mis en contact avec une source chaude ou froide et qui subit des détentes ou compressions. Cette machine est soit un moteur thermique ( $W < 0$ ), soit une machine frigorifique ( $Q < 0$ ) qui transfère de l'énergie du réservoir froid vers le réservoir chaud.



# Cycles moteurs

1→2 contact avec la source froide  $T_F$  et compression : évolution réversible infinitésimale.

On apporte du travail au système qui va céder de la chaleur à la source froide  $\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q_F}{T_F} < 0$ .

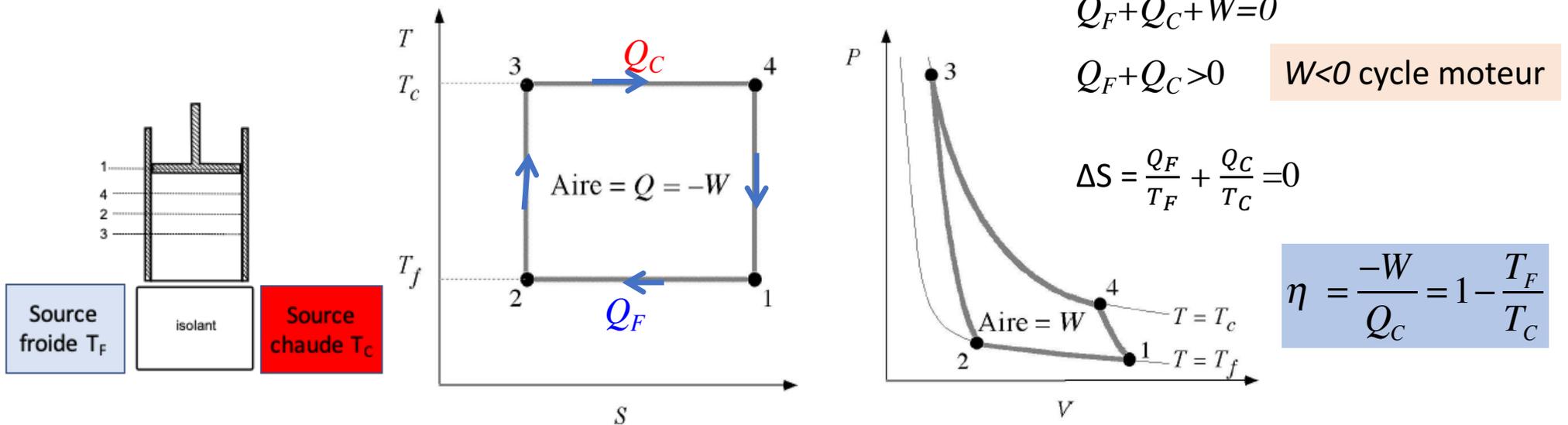
2→3 la compression se poursuit, le fond étant isolée : compression adiabatique réversible

$\Delta S = S_3 - S_2 = 0$ , la température du fluide s'élève à  $T_C$

3→4 le cylindre est en contact avec la source chaude  $T_C$  et le fluide est détendu. Le réservoir chaud

cède au fluide une quantité de chaleur  $Q_C$ .  $\Delta S = S_4 - S_3 = \frac{Q_C}{T_C} > 0$ .

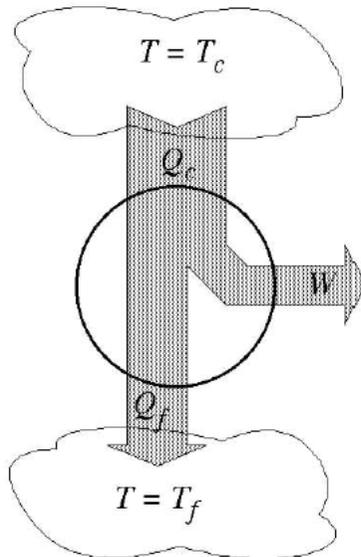
4→1 La détente se poursuit de manière adiabatique réversible, jusqu'à ce que la température soit  $T_F$



# Cycles frigorifiques

Le cycle est parcouru dans le sens opposé

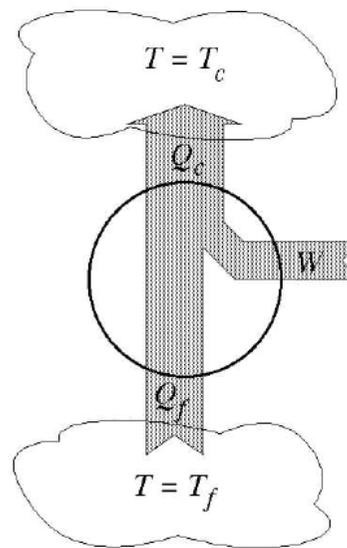
Cycle moteur



$W < 0$  cycle moteur

$$\eta = \frac{-W}{Q_C} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Cycle récepteur



$$Q_F + Q_C + W = 0$$

$W > 0$  cycle récepteur

ex : cycle frigorifique  
 $W > 0, Q_F > 0, Q_C < 0$

Réfrigérateur

$$\eta = \frac{Q_F}{W} = \frac{1}{T_C/T_F - 1} = \text{COP}$$

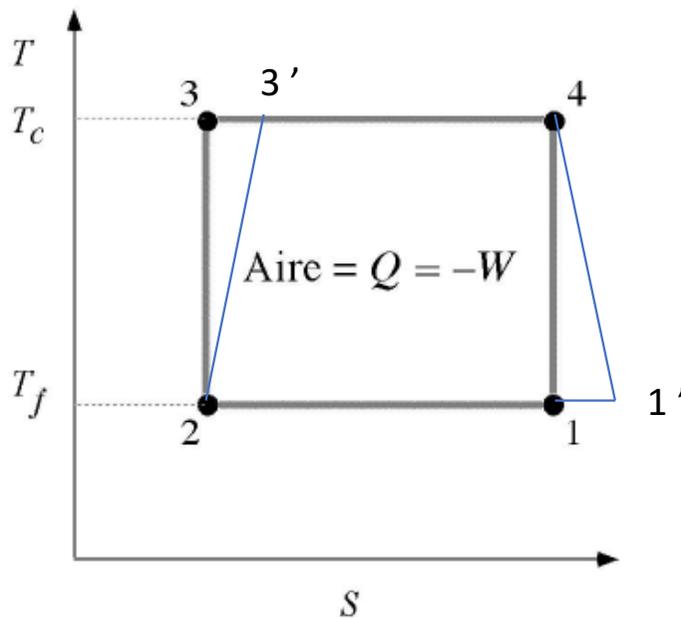
Coefficient of Performance

Pompe à chaleur

$$\eta = \frac{-Q_C}{W} = \frac{1}{1 - T_F/T_C}$$

# Cycles thermodynamiques réels

Cycle de réel :



$$Q_F + Q_C + W = 0$$

$W < 0$  cycle moteur

$$\Delta S = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} + \Delta S_i = 0$$

$$\rightarrow \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0$$

$$\eta = \frac{-W}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} < 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

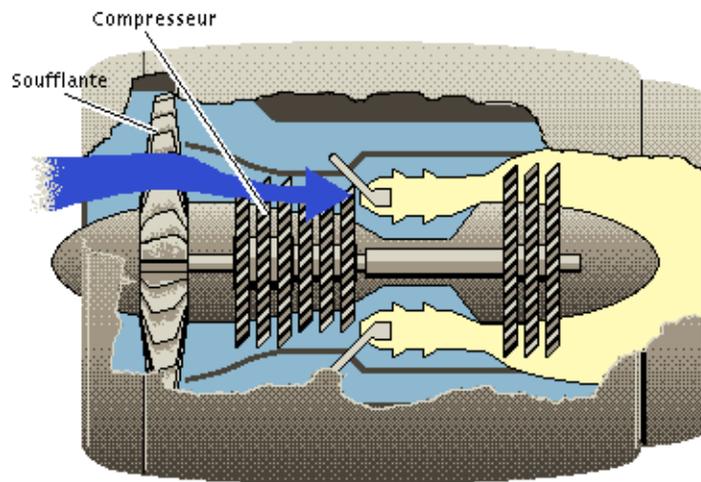
Le rendement maximum est obtenu pour le cycle de Carnot avec transformations réversibles

# Turbines à gaz

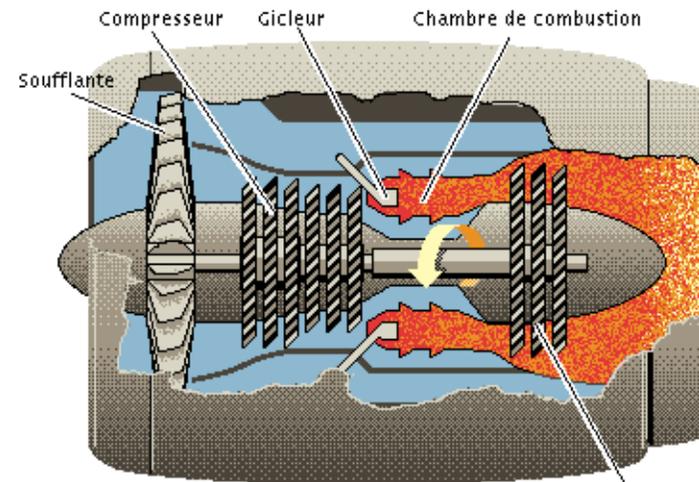
## Applications

- Production d'énergie mécanique à partir de cycle à gaz non condensable
- Cycle à combustion interne
- Production électrique
- Propulsion des véhicules terrestre, maritime et aérien
- Cycles séquentiels (moteurs alternatifs à allumage commandé ou diesel)
- Cycles ouverts (TAG, turbopropulseur à hélice, turboréacteurs,...

Cycle de Brayton : l'air est aspiré par un turbo-compresseur et acheminé à une chambre de combustion où il est mélangé à un combustible. Les gaz se détendent dans la turbine



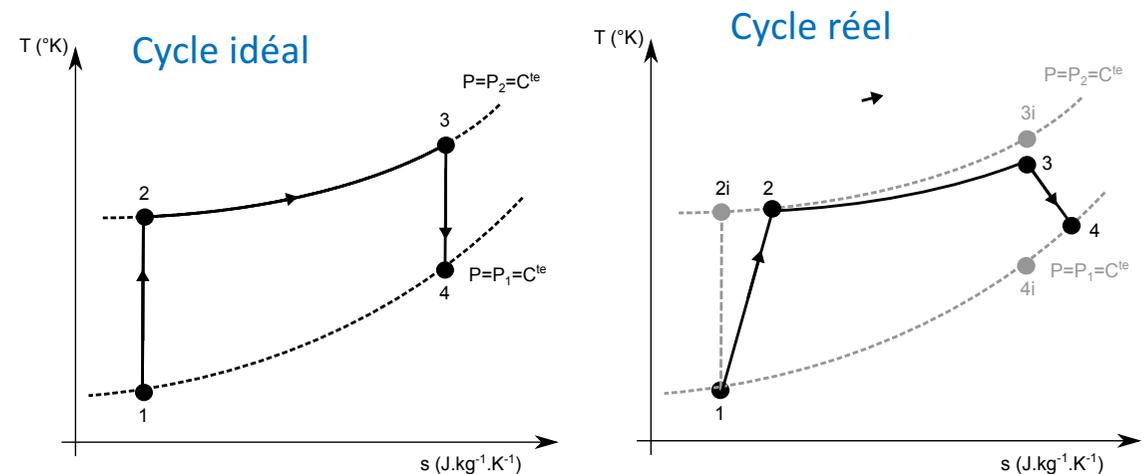
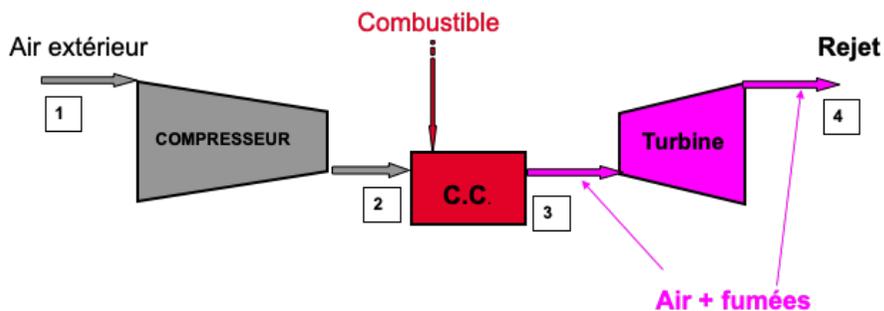
Aspiration et compression de l'air



Les gaz de sortie font tourner la turbine. Turbine

# Turbines à gaz

- Cycle de Brayton : l'air est aspiré par un turbo-compresseur et acheminé à une chambre de combustion où il est mélangé à un combustible. Les gaz se détendent dans la turbine



$$W_C = h_2 - h_1 > 0$$

$$Q_C = h_3 - h_2 > 0$$

$$W_T = h_4 - h_3 < 0$$

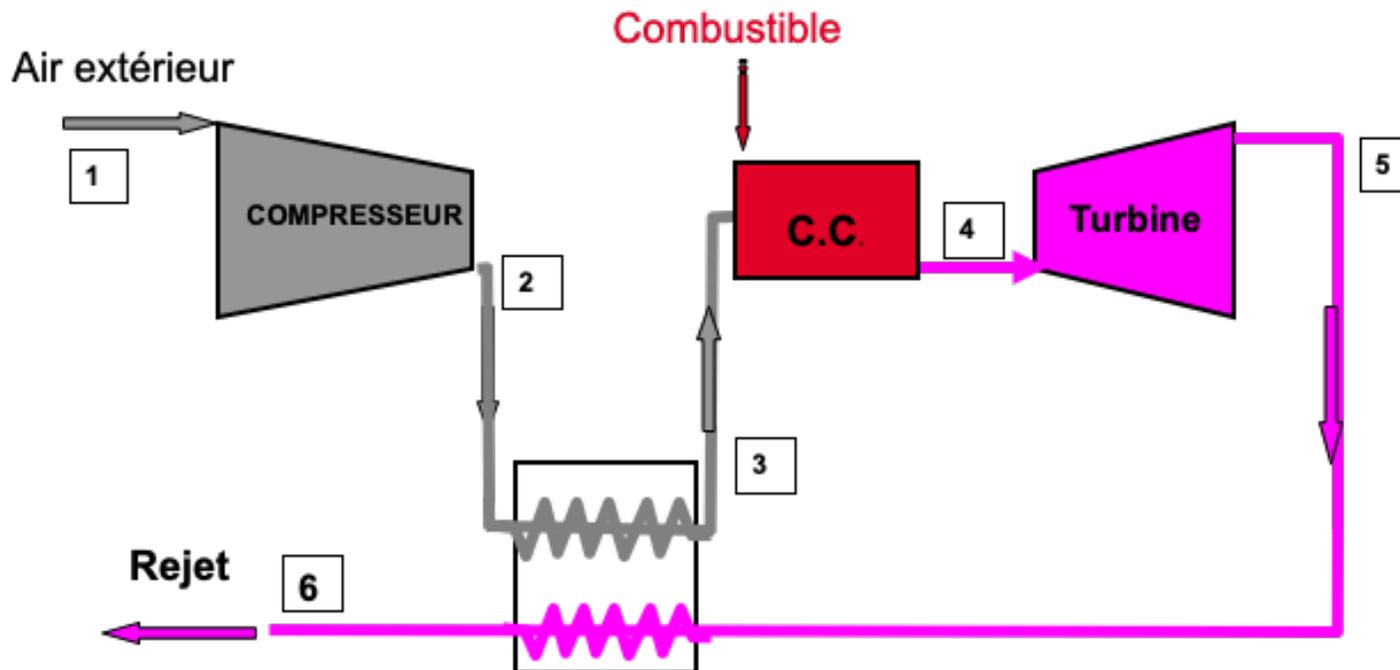
Rendement utile

$$\eta_{th} = \frac{-W_C - W_T}{Q_C} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \tau^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

Gaz parfait  $h = c_p T$   $\tau = P_2/P_1$  compression/détente isentropiques  $T P^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = Cte$

# Turbines à gaz à régénération

- Généralement le rendement des turbines à gaz est assez faible, de l'ordre de 30%. Les gaz rejetés en sortie en turbine sont chaud et des systèmes de récupération d'énergie peuvent être envisagés. C'est le cas des TAG à régénération.



## Cycle de Brayton complexe : double compression, double détente

