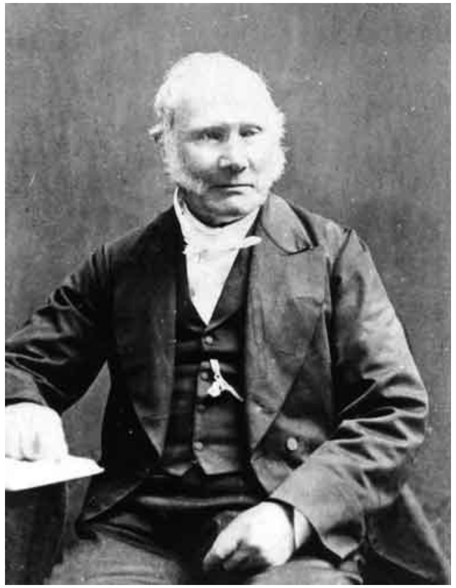
Cours 8

- Second principe de la thermodynamique.
  - Cycle de Carnot.
  - Cycle de Stirling.





Les objectifs du cours 8

1. Comment faire pour générer un travail moteur avec un cycle?

2. Cycles avec deux sources de chaleur à deux températures différentes

   - Cycle de Carnot

3.
   - Cycle de Stirling

Motivations

- On sait qu'il est possible de convertir du travail en chaleur.
  - Exemple : forces de frottement.

- On peut convertir *toute* l'énergie mécanique en chaleur.
  - Exemple : Dans des freins, toute l'énergie cinétique de la voiture est convertie en chaleur.

- On peut engendrer du travail mécanique avec de la chaleur
  - Exemple : un piston que l'on chauffe ou que l'on refroidit.

Motivations

- **Questions :**

1. On s'intéresse à des systèmes qui vont engendrer un travail moteur en *continu*.
   - ≠ Une pile électrique ou bien un cylindre de gaz comprimé par exemple
   - ⇒ *Cycle*.
   - *Rappel : le travail est donné par l'**aire** comprise dans le cycle sur un diagramme p-V et travail moteur ⇒ sens **horaire***.

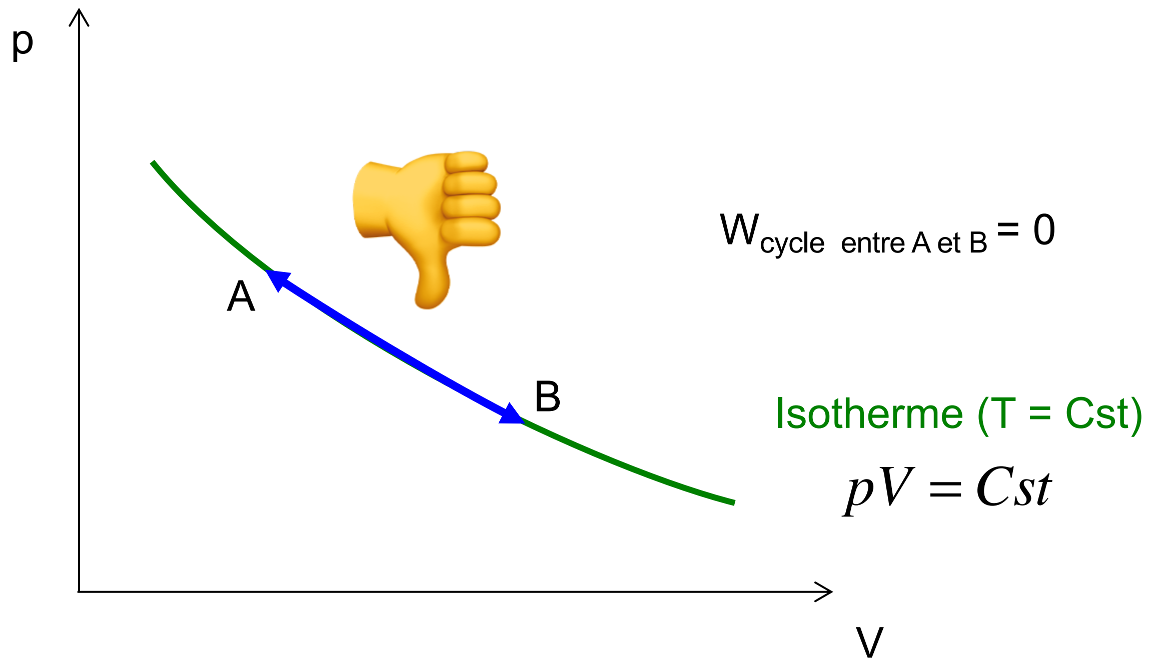
2. Y a t'il des conditions nécessaires à satisfaire ?

3. Peut on convertir tout échange de chaleur Q en un travail *moteur*
   i.e. $W_{ext} = -W = Q > 0$?

4. Peut on utiliser la chaleur d'un seul thermostat (*e.g.* lac, océan) pour faire fonctionner un moteur ?

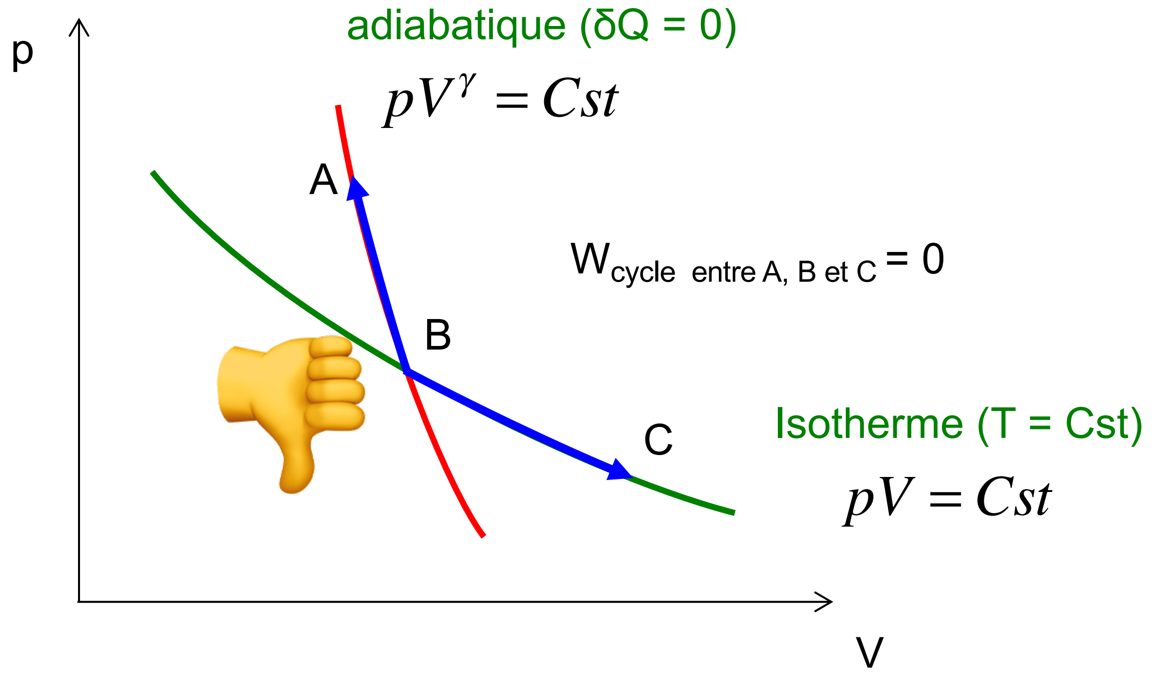
Motivations

- Que pourrait on envisager avec un gaz parfait, des transformations quasi-statiques en contact avec *un seul* thermostat à la température T ?
  - En se déplaçant sur une isotherme ?



Motivations

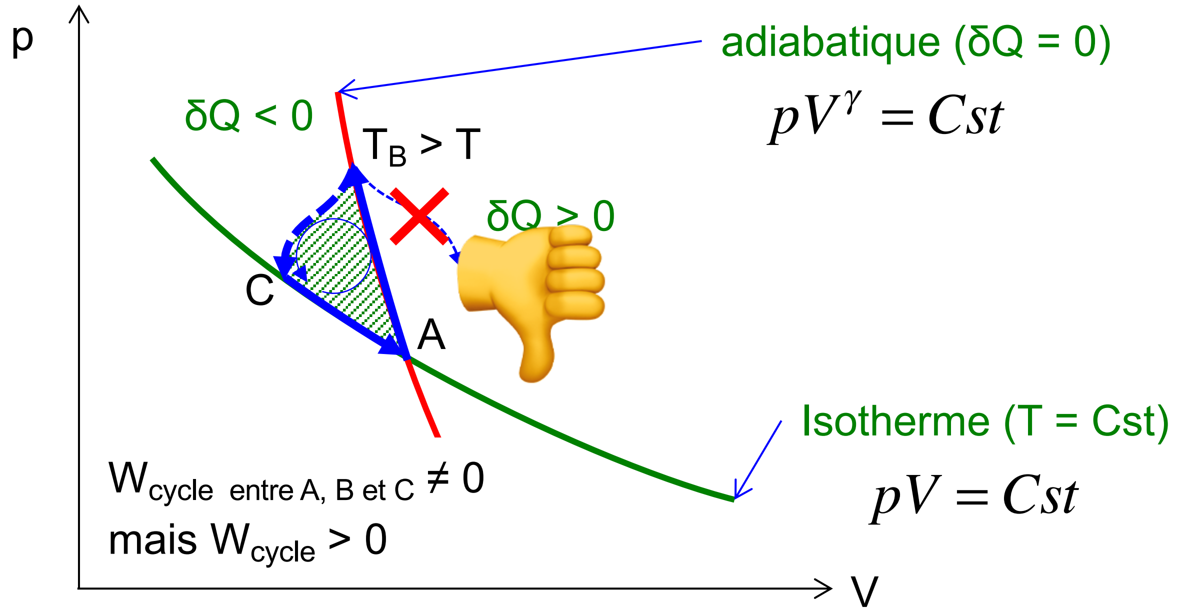
- Que pourrait on envisager avec un gaz parfait, des transformations quasi-statiques en contact avec *un seul* thermostat à la température T ?
  - En se déplaçant sur une isotherme et une adiabatique ?



Motivations

- Que pourrait on envisager avec un gaz parfait, des transformations quasi-statiques en contact avec *un seul* thermostat à la température T ?
  - En laissant le système évoluer spontanément ?
  - Quels chemins sont possibles ?

Sens commun ("version de l'homme de la rue du second principe") : Entre un corps chaud et un corps froid, la chaleur va toujours *spontanément* du chaud *vers* le froid.
- On ne réchauffe pas de l'eau avec un glaçon.
- On ne chauffe pas un appartement l'hiver en ouvrant les fenêtres.



Motivations

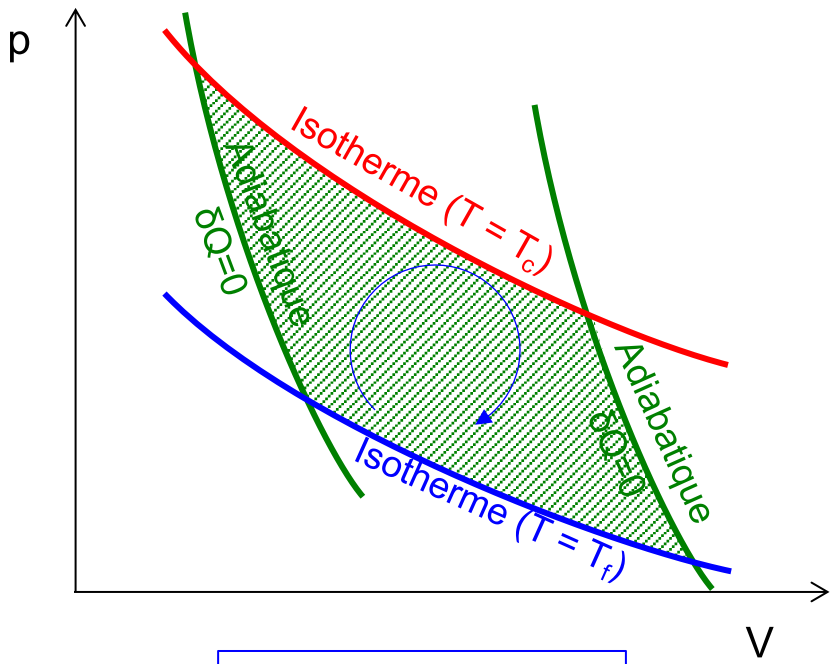
- Il semble qu'il ne soit pas possible de trouver des *cycles moteurs* pour des systèmes en contact avec *une seule source de chaleur* (un thermostat).

- **Attention**, ce qui précède *n'est pas* une démonstration. C'est une discussion qualitative et pragmative de quelques cas particuliers. Le but de ce chapitre et du second principe sera de postuler des lois générales qui précisent dans quelle mesure on peut *transformer de la chaleur en travail* et quelles transformations sont physiquement *possibles* et lesquelles sont *impossibles*.

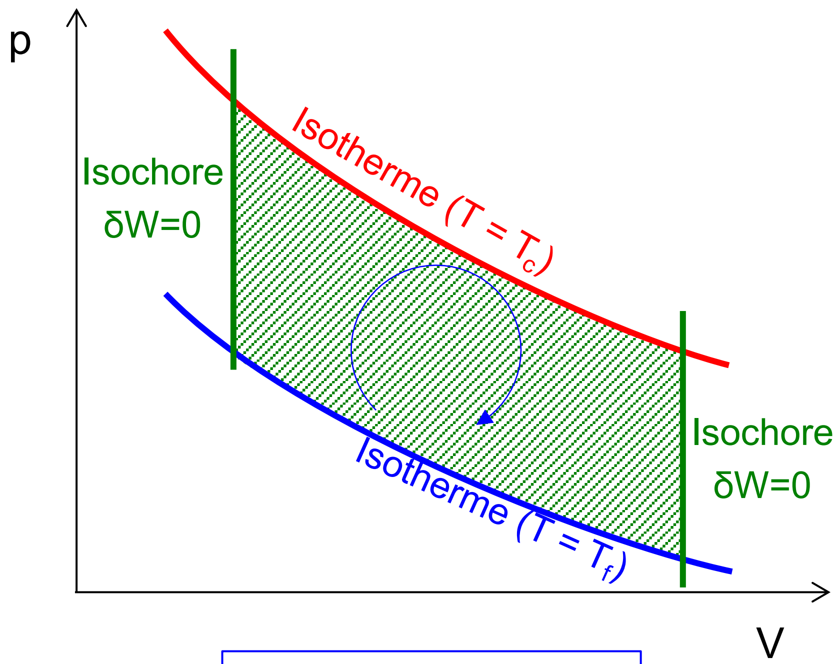
- Voyons ce qu'il est possible de faire avec *deux* sources de chaleur T_{chaud} et T_{froid} (c.a.d. deux thermostats).

Motivations

- Deux sources de chaleur T_{chaud} et T_{froid} (c.a.d. deux thermostats).
    - Transformations à T = Cst le long des isothermes T_c et T_f.
    - Transitions entre les isothermes.
    - Deux cas simples : Transition à $\delta Q = 0$ ou bien à $\delta W = 0$.



Cycle de Carnot



Cycle de Stirling

Les objectifs du cours 8

1 Comment faire pour générer un travail moteur avec un cycle?

2 Cycles avec deux sources de chaleur à deux températures différentes

- Cycle de Carnot

3
- Cycle de Stirling

RÉFLEXIONS

SUR LA

PUISSANCE MOTRICE

DU FEU

ET

SUR LES MACHINES

PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE.

PAR S. CARNOT,

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

A PARIS,

CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,

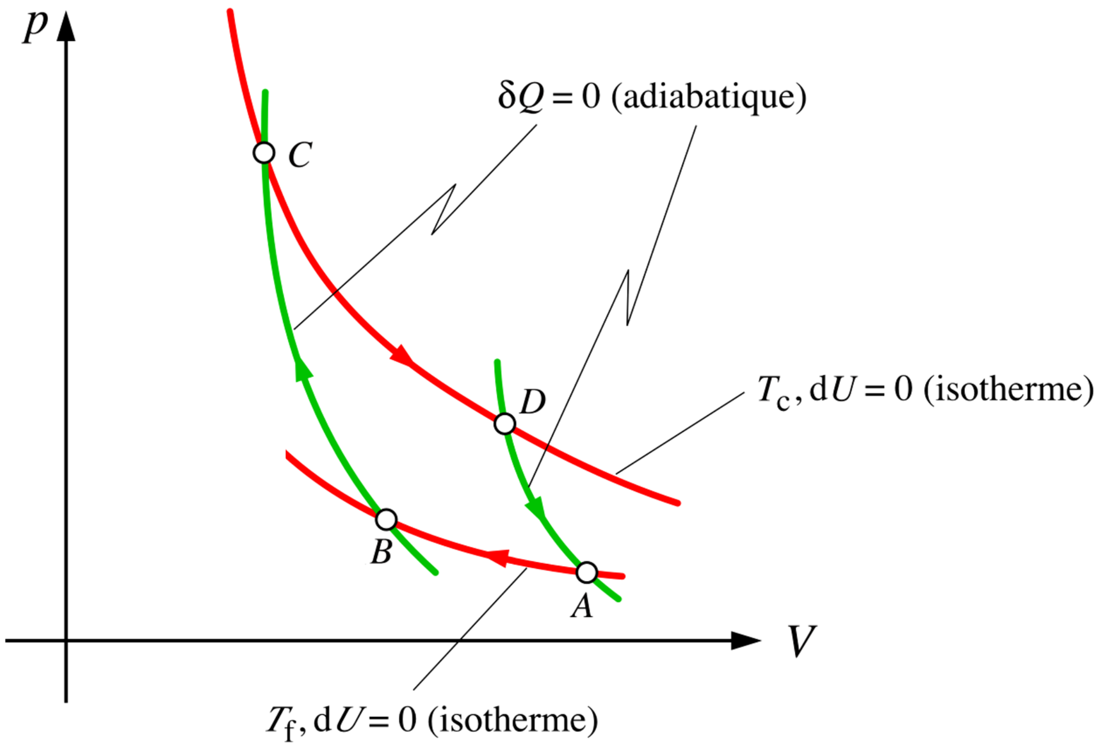
QUAI DES AUGUSTINS, N°. 55.

1824.

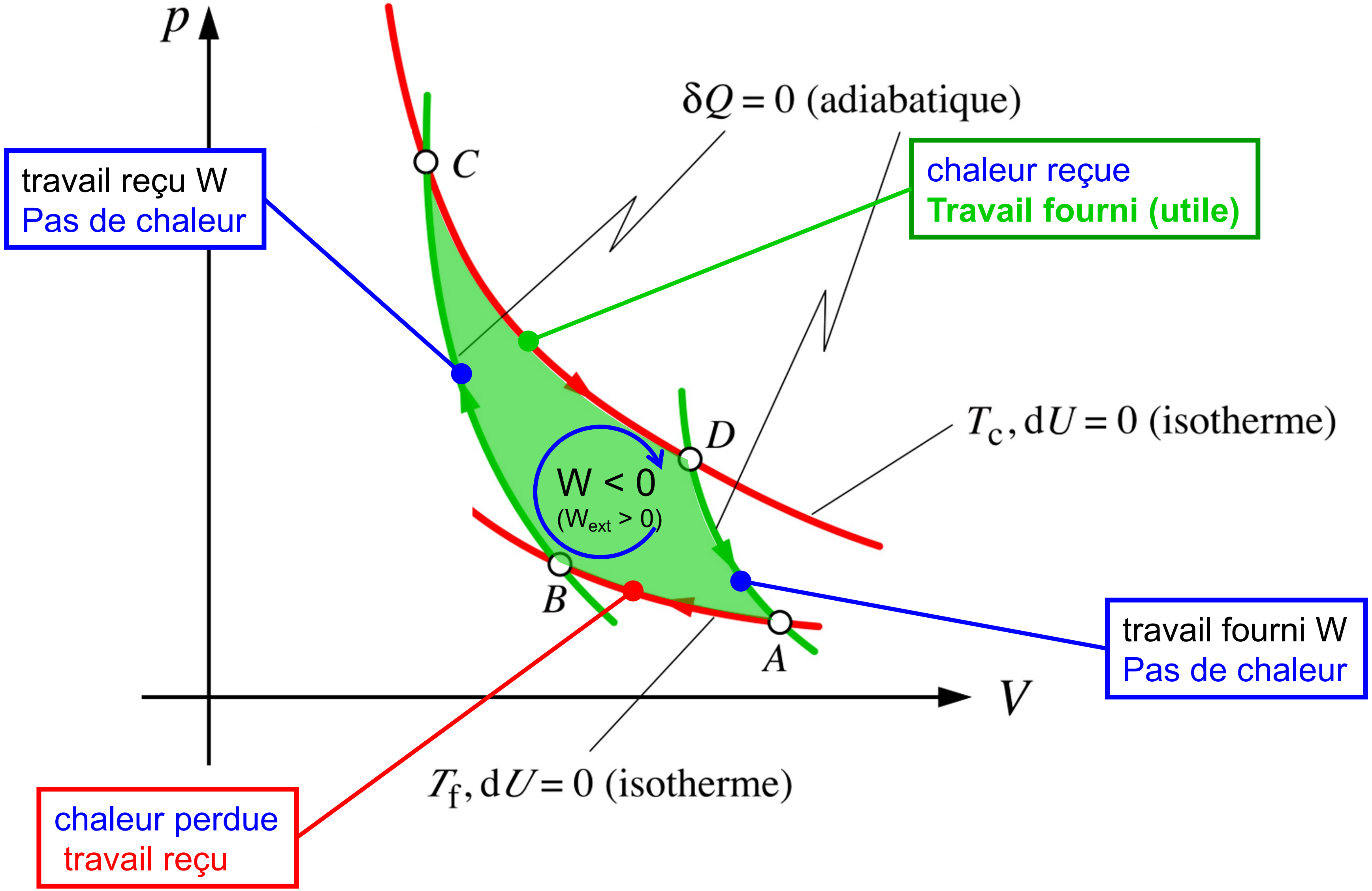
Sadi Carnot
1796 - 1832

Machine de Carnot (ou cycle de Carnot), 1ère définition :

- Soit un *gaz parfait* qui décrit un cycle (A,B,C,D) composé de
  - 2 transformations *adiabatiques*
  - 2 transformations *isothermes*
  - Les transformations sont *quasi-statiques*

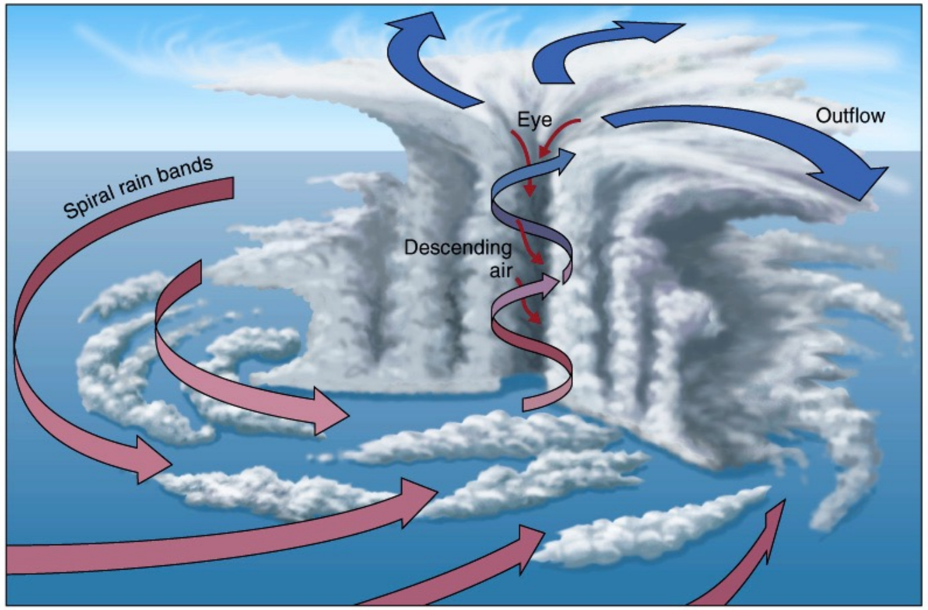


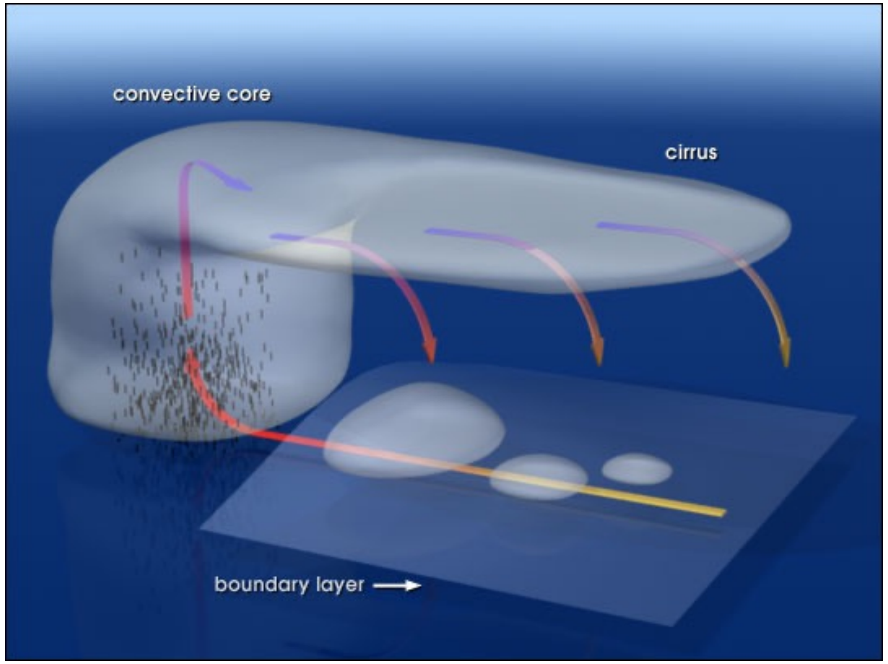
Cycle de Carnot



Cycle de Carnot

Cyclones





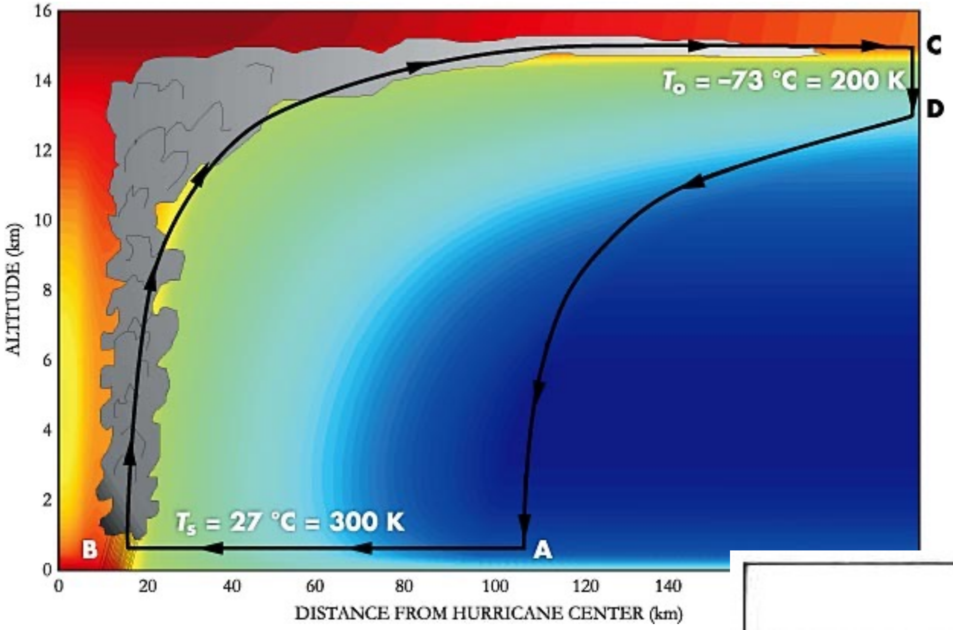
Ordre de grandeur :

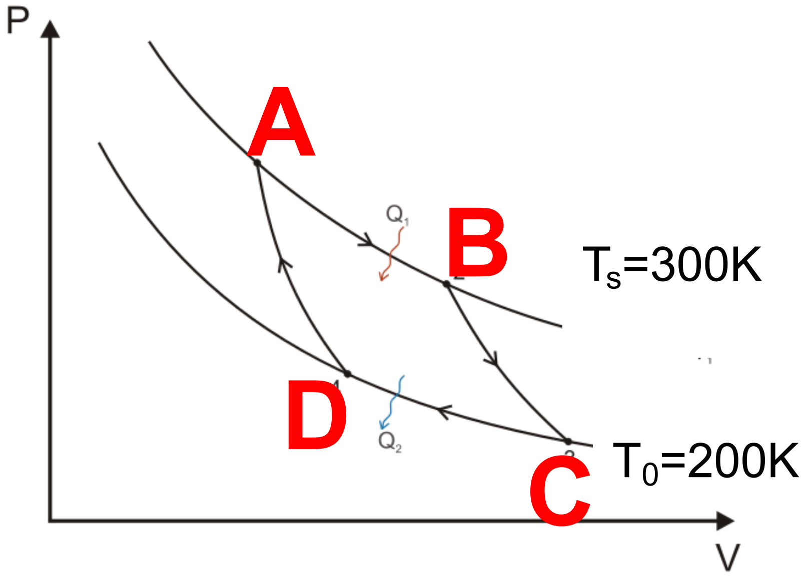
$P_{cyclone}$ ≈ 100 GW

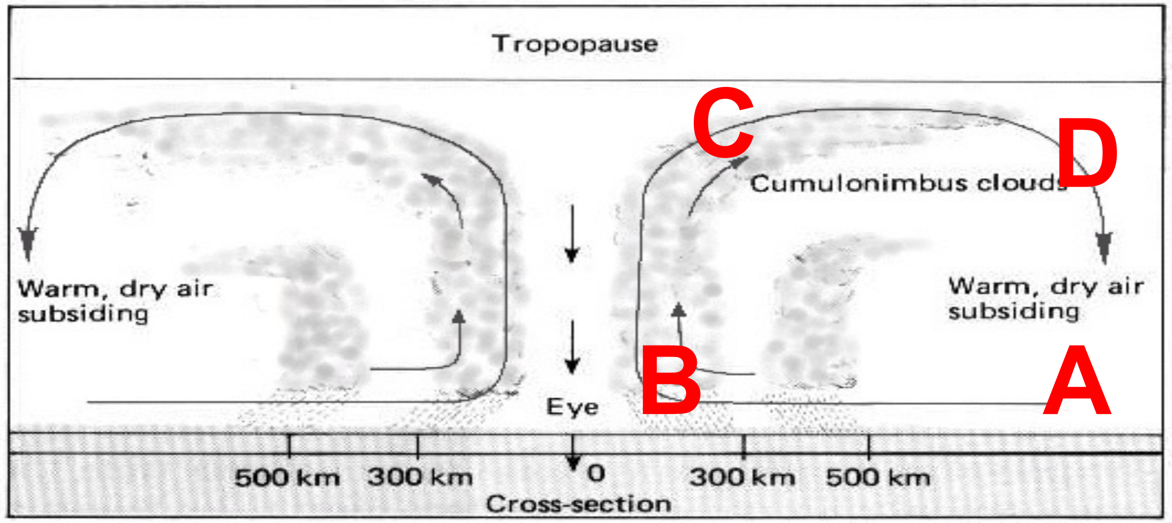
(≈ 100 centrales nucléaires)

svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a003300/a003377/Bonnie1998_mm5model.mpg

Cyclones







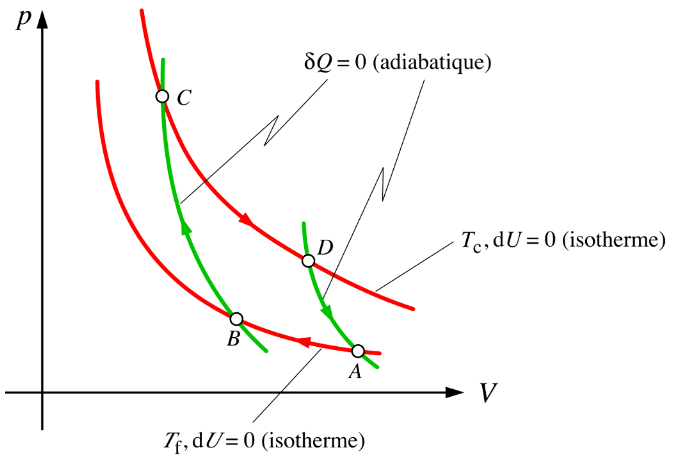
Différences avec un cycle de Carnot :

- W est dissipé sous forme de vents turbulents et de chaleur dans l'environnement dans Q_1 à T_s
- Une partie de l'énergie est dissipée sous forme de changement d'état (pluie)

Cycle de Carnot

Calcul du travail

Gaz parfait: $pV = nRT$
Transformation isotherme: $pV = Cte$
Transformation adiabatique: $pV^{\gamma} = cte$ ou $TV^{\gamma-1} = cte$
Energie interne: $U = f/2.nRT$
1er principe: $dU = \delta Q + \delta W$



- De A à B: Transformation isotherme: $dU = 0$ et $Q = -W$ **chaleur perdue**
  $\delta W = -\,pdV \Rightarrow W_{AB} = -\,nRT_f \ln(V_B/V_A) = -\,Q_{AB} > 0 \quad (V_B<V_A)$ **travail reçu**

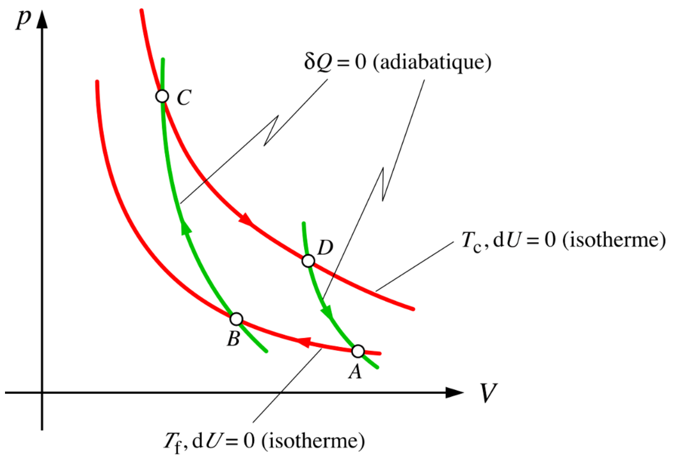
- De B à C: Transformation adiabatique: $\delta Q = 0$ et $\Delta U = W$
  $W_{BC} = U_C - U_B = f/2.nR(T_c - T_f) > 0$ **travail reçu**

- De C à D: Transformation isotherme: $dU = 0$ et $Q = -W$ **chaleur reçue**
  $\delta W = -\,pdV \Rightarrow W_{CD} = -\,nRT_c \ln(V_D/V_C) = -\,Q_{CD} < 0 \quad (V_D>V_C)$ **travail fourni**

- De D à A: Transformation adiabatique: $\delta Q = 0$ et $\Delta U = W$
  $W_{DA} = U_A - U_D = f/2.nR(T_f - T_c) = -\,W_{BC} < 0$ **travail fourni**

Cycle de Carnot

Calcul du travail



- **Bilan des travaux suivant les deux isothermes**

$W_{AB} = -nRT_f \ln(V_B / V_A)$ $W_{CD} = -nRT_c \ln(V_D / V_C)$

$$\left.\begin{aligned} TV^{\gamma-1} = \text{cte soit } T_f V_B^{\gamma-1} = T_c V_C^{\gamma-1} &\Rightarrow (V_B / V_C)^{\gamma-1} = T_c / T_f \\ T_c V_D^{\gamma-1} = T_f V_A^{\gamma-1} &\Rightarrow (V_A / V_D)^{\gamma-1} = T_c / T_f \end{aligned}\right\}$$

$\Rightarrow V_B / V_C = V_A / V_D$ $\boxed{\Rightarrow V_B / V_A = V_C / V_D}$

- **Relation entre travaux**

$\boxed{W_{AB} / W_{CD} = -T_f / T_c}$

$\boxed{\text{On constate également que } W_{BC} = -W_{DA} = \Delta U_{BC} = -\Delta U_{DA}}$

$\Rightarrow$ le travail reçu entre B et C est perdu entre D et A.

Cycle de Carnot

Calcul du travail

- **Bilan total des travaux sur un cycle :**

$$\oint \delta W = W_{AB} + W_{CD} = -nRT_f \ln\frac{V_B}{V_A} - nRT_c \ln\frac{V_D}{V_C} = nRT_f \ln\frac{V_D}{V_C} - nRT_c \ln\frac{V_D}{V_C}$$

$$W = -nR(T_c - T_f)\ln\frac{V_D}{V_C}$$

Le système fournit du travail au cours du cycle

- **Relation entre échanges de chaleur et températures**

$Q_{AB} = nRT_f \ln(V_B/V_A) < 0$

$Q_{CD} = nRT_c \ln(V_D/V_C) = nRT_c \ln(V_A/V_B) > 0$

Rappel : $V_B / V_A = V_C / V_D$

$Q_{CD} / T_c + Q_{AB} / T_f = 0$

Calcul du travail

- **Relation entre échanges de chaleur et températures durant le cycle**

$$\frac{Q_{CD}}{T_c}+\frac{Q_{AB}}{T_f}=0 \qquad \boxed{\frac{Q_c}{T_c}+\frac{Q_f}{T_f}=0}$$

- **Relation entre travail, échanges de chaleur et températures durant le cycle**

$$W=-nR(T_c-T_f)\ln\frac{V_D}{V_C} \qquad Q_{CD}=nRT_c\ln\frac{V_D}{V_C}$$

$$W=Q_{CD}\frac{(T_f-T_c)}{T_c}=Q_{AB}\frac{(T_c-T_f)}{T_f}$$

$$\boxed{W=Q_c\frac{(T_f-T_c)}{T_c}=Q_f\frac{(T_c-T_f)}{T_f}}$$

Interprétations des relations ente W, Q_c et Q_f :

$$\frac{Q_c}{Q_f} = -\frac{T_c}{T_f}$$

$$\eta_{Q_c} = \frac{W}{Q_c} = \frac{(T_f - T_c)}{T_c}$$

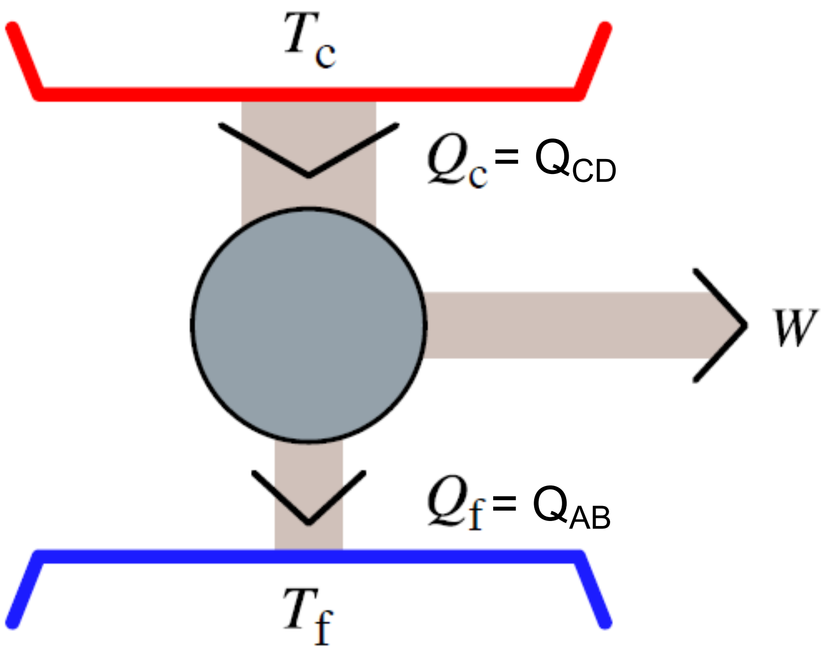
$$\eta_{Q_f} = \frac{W}{Q_f} = \frac{(T_c - T_f)}{T_f}$$

Ces relations sont *toujours vraies*, quelque soit le sens du cycle.

On peut leur donner une interprétation pratique (efficacité ou coefficient de performance) selon l'usage à laquelle on destine la machine.

Cycle de Carnot

Efficacité cycle moteur



$Q_f < 0$ "gratuite" $Q_c > 0$ $W < 0$

- On définit l'efficacité de la machine de Carnot (cycle moteur) par :

$$\boxed{\eta_{Carnot} = W_{moteur}/Q_c = -W/Q_c}$$

- avec $W_{moteur} = -W = Q_c(T_c - T_f)/T_c$

- Soit $\boxed{\eta_{Carnot} = (T_c - T_f)/T_c}$

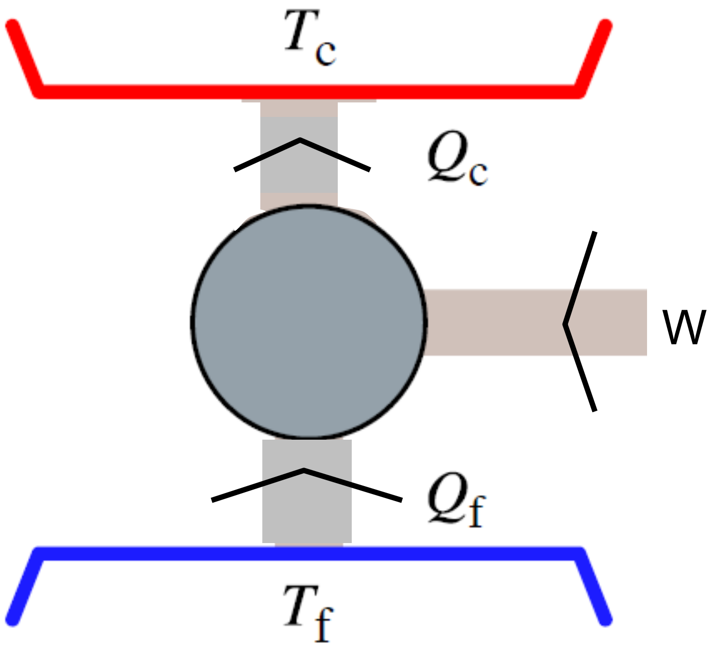
- Comme $W = -Q_f - Q_c$ alors

$$\boxed{\begin{aligned}\eta_{Carnot} &= (Q_c + Q_f)/Q_c \\ \eta_{Carnot} &= (1 + Q_f/Q_c)\end{aligned}}$$

AN: si $T_f = 300$ K et $T_c = 400$ K alors $\eta = 25\%$

Efficacité cycle inverse, réfrigérateur

- Dans un cycle de Carnot **moteur**, la machine reçoit de la chaleur de la source chaude et en fournit à la source froide.
- **Cycle inverse** : on "enlève" de la chaleur à la source froide et on en fournit à la source chaude (gratuite) ⇒ il faut alors fournir du travail au système.
- *Note : le calcul précédent est toujours valable, seuls les signes de W_{ij} et Q_{ij} changent.*



$Q_f > 0$ $Q_c < 0$ "gratuite" $W > 0$

- On définit le **coefficient de performance** ou l'**efficacité** d'un réfrigérateur (cycle de Carnot inverse) par :

$$\boxed{\eta_{frigo} = Q_f / W}$$

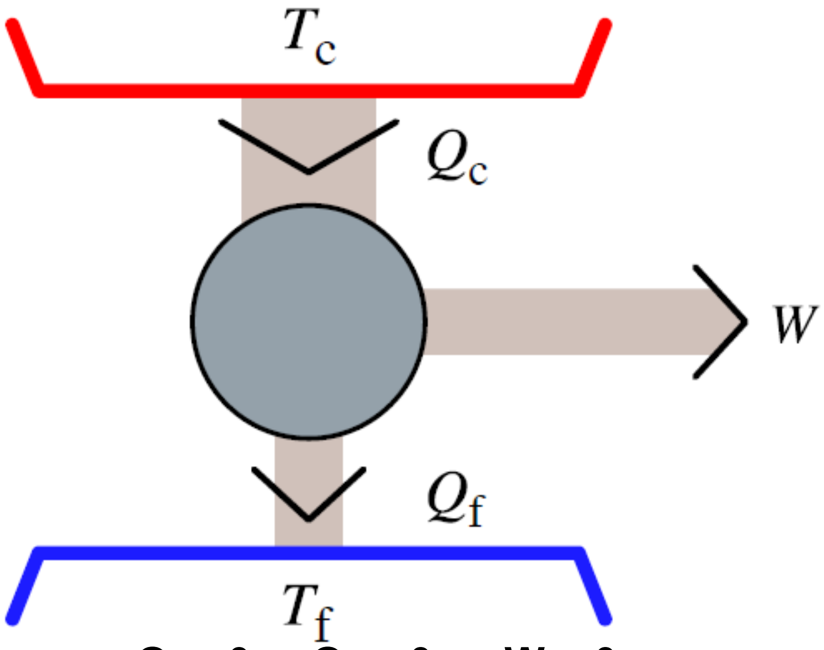
- $W = -(Q_f + Q_c)$ et $\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} = 0$

$$Q_c = -\frac{T_c}{T_f} Q_f \quad \text{et } W = (T_c / T_f - 1) Q_f$$

- Soit $\boxed{\eta_{frigo} = T_f / (T_c - T_f)}$

Cycle de Carnot

- **Machine de Carnot (ou cycle moteur de Carnot) :**



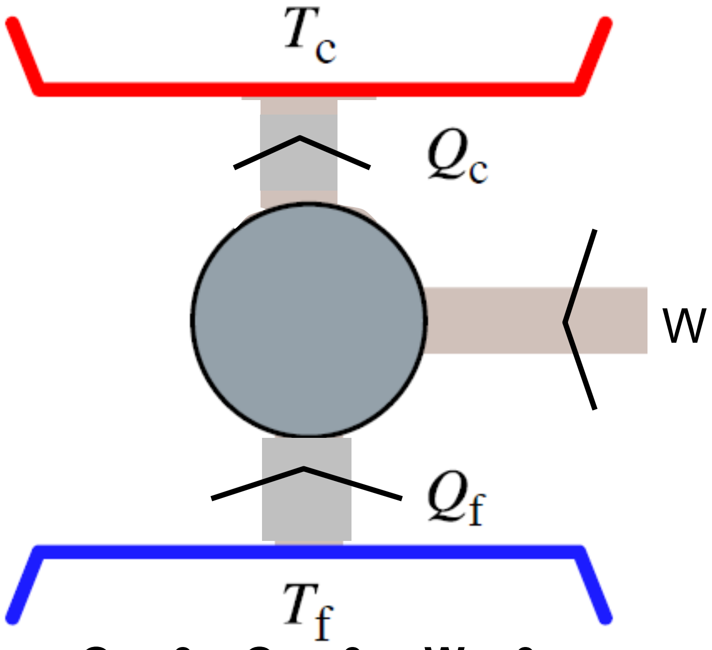
$Q_f < 0$ $Q_c > 0$ $W < 0$

$\eta_{Carnot} = -W/Q_c$

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

Source froide "gratuite"

- **Machine de Carnot inverse (ou réfrigérateur) :**



$Q_f > 0$ $Q_c < 0$ $W > 0$

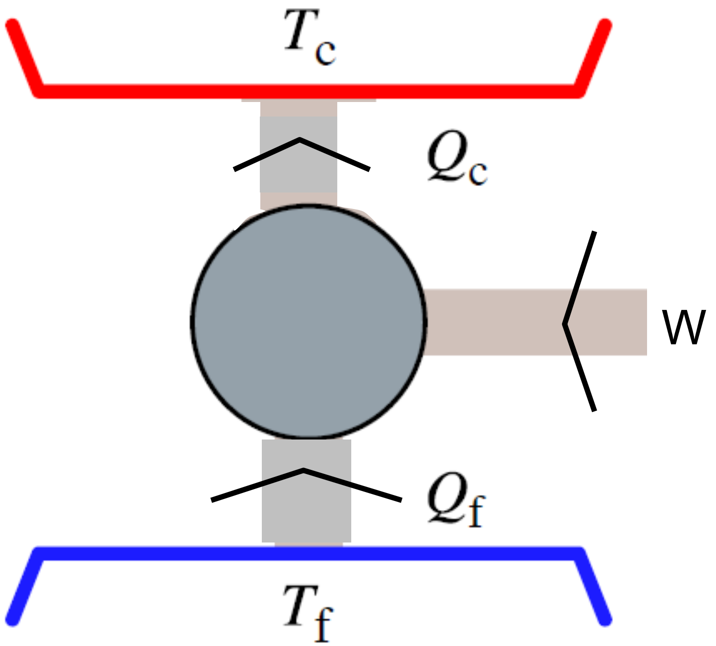
$\eta_{frigo} = Q_f / W$

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

Source chaude "gratuite"

Un autre usage possible, pompe à chaleur :

- Fonctionnement sur un cycle inverse mais maintenant on s'intéresse à la chaleur fournie à la source chaude.



$Q_f > 0$ $Q_c < 0$ $W > 0$

Source froide "gratuite"

- **Coefficient de performance** ou **efficacité** :

$$\boxed{\eta_{PAC} = -\,Q_c / W}$$

- $W = -\,(Q_f + Q_c)$ $\quad Q_f = -\frac{T_f}{T_c} Q_c \quad$ et $W = (T_c/T_f - 1)Q_f$

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

Cycle de Carnot

$$\frac{W}{Q_c} = \frac{(T_f - T_c)}{T_c} \quad \text{et} \quad \frac{W}{Q_f} = \frac{(T_c - T_f)}{T_f}$$

Rappel : ces relations sont *toujours vraies*, quelque soit le sens du cycle.

Efficacité ou **Coefficient de performance** = $\dfrac{\textbf{Quantité désirée}}{\textbf{Coût, énergie à fournir}}$

Les interpréter comme un rendement, une efficacité ou un coefficient de performance (COP) dépend de l'usage à laquelle on destine la machine.

$\eta_{Carnot} = -W/Q_c$

$\eta_{Carnot} = \mathbf{-\, W/Q_c = (T_c - T_f)/T_c}$

Quantité désirée : W
Energie à fournir : Q_c
Source froide Q_f "gratuite"

$\eta_{frigo} = Q_f /W$

$\eta_{frigo} = \mathbf{+\, Q_f /W = T_f /(T_c - T_f)}$

Quantité désirée : Q_f
Energie à fournir : W
Source chaude Q_c "gratuite"

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

$\eta_{PAC} = \mathbf{-\, Q_c /W = T_c /(T_c - T_f)}$

Quantité désirée : Q_c
Energie à fournir : W
Source froide Q_f "gratuite"

Les objectifs du cours 8

1 Comment faire pour générer un travail moteur avec un cycle?

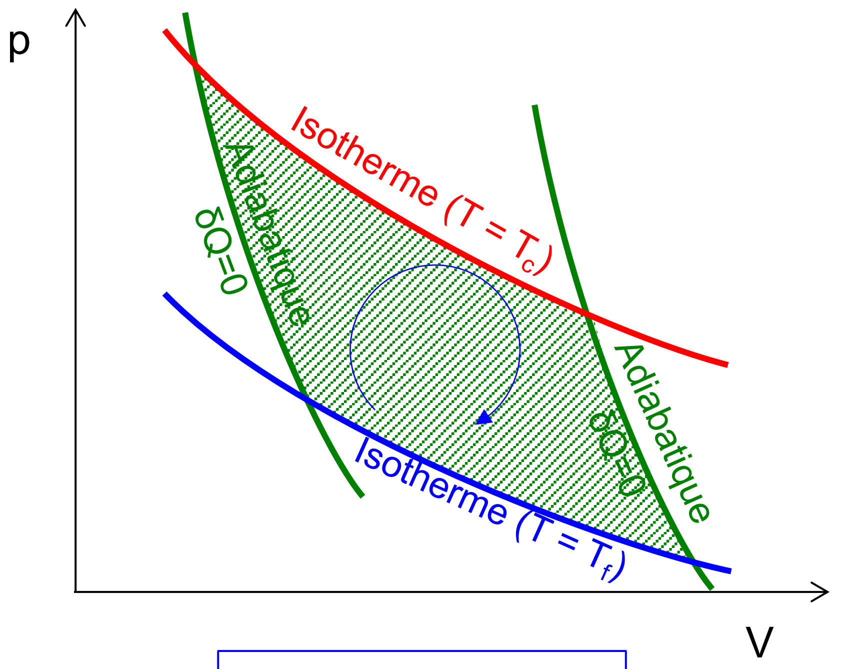
2 Cycles avec deux sources de chaleur à deux températures différentes

- Cycle de Carnot

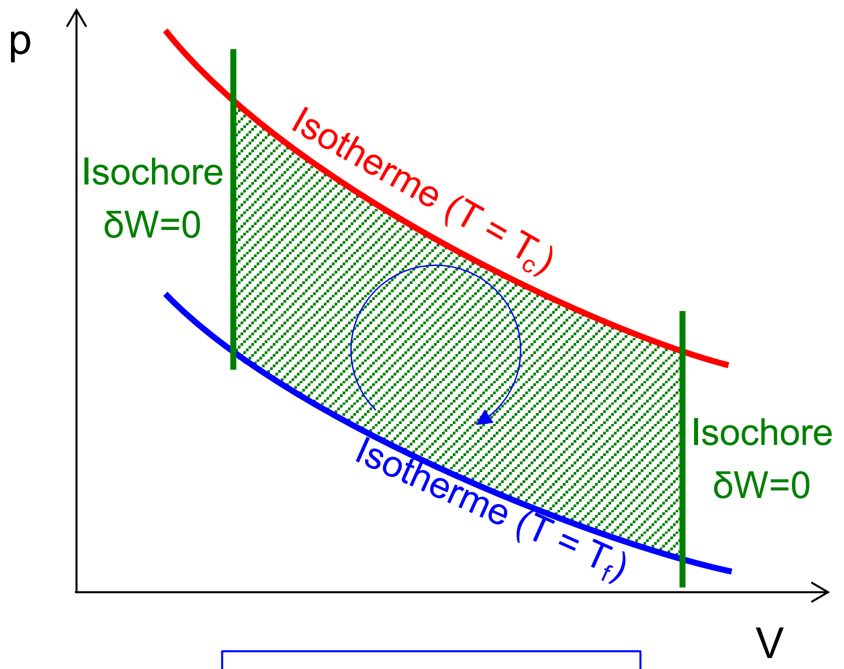
3
- Cycle de Stirling

Motivations

- Deux sources de chaleur T_{chaud} et T_{froid} (c.a.d. deux thermostats).
  - Transformations à T = Cst le long des isothermes T_c et T_f.
  - Transitions entre les isothermes.
  - Deux cas simples : Transition à $\delta Q = 0$ ou bien à $\delta W = 0$.



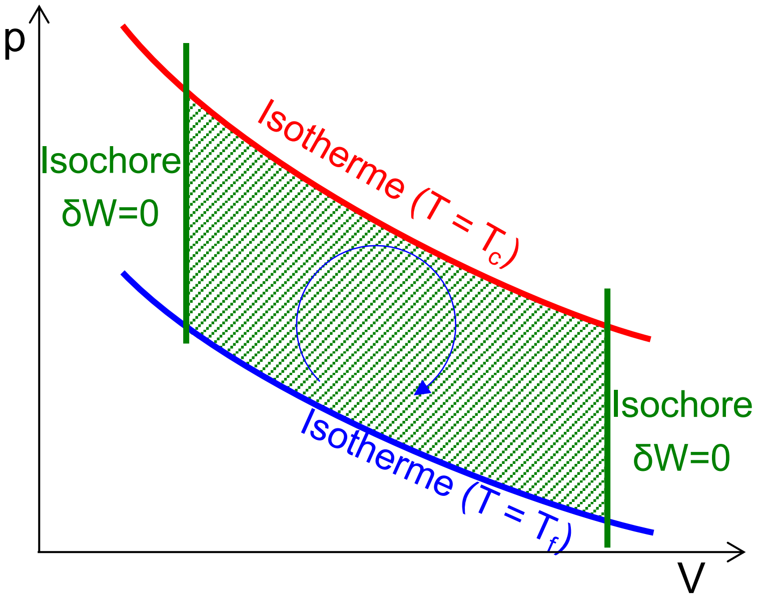
Cycle de Carnot



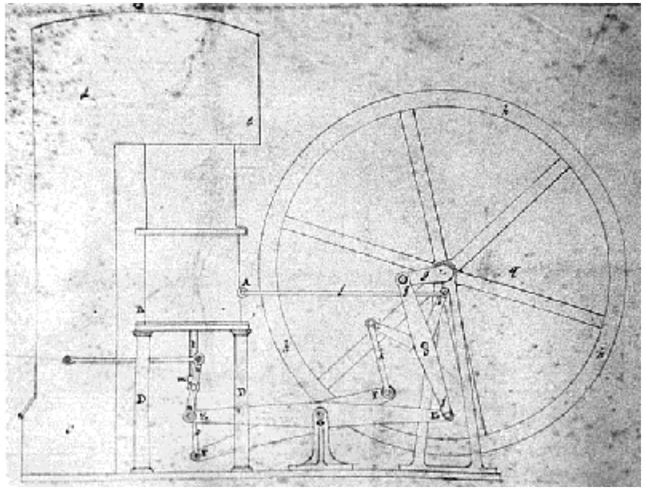
Cycle de Stirling

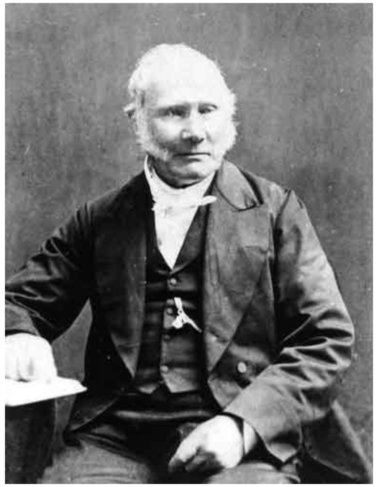
Cycle de Stirling

R. Stirling propose son moteur en 1816



Le cycle de Stirling est constitué de
- 2 isothermes
- 2 isochores

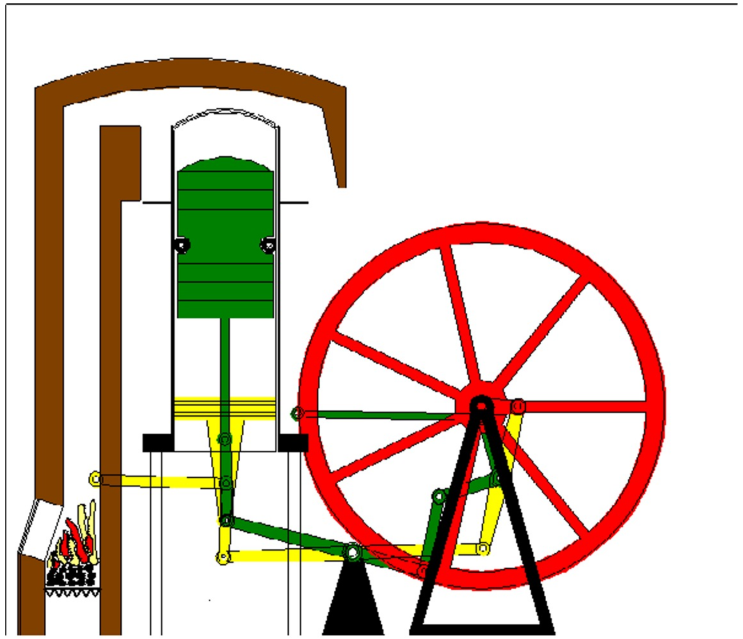




Robert Stirling
1798-1878

Cycle de Stirling

R. Stirling propose son moteur en 1816

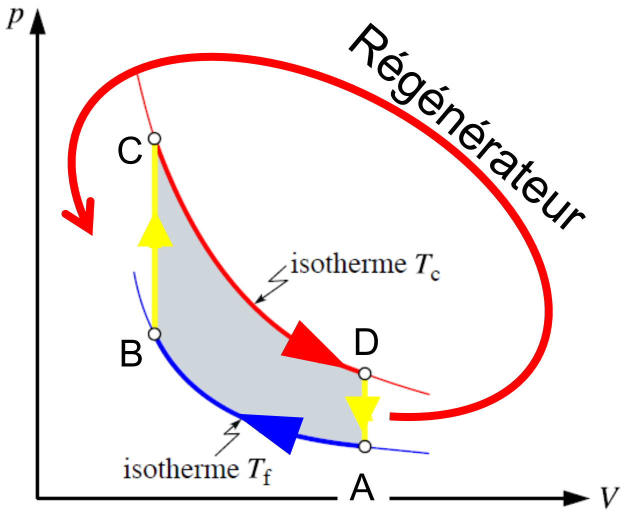


- Le mouvement du piston provient des variations de pression d’un fluide qui circule en *circuit fermé*.
- La combustion du carburant s’effectue dans une enceinte *séparée* de celle contenant le fluide actif et le piston.

Avantages :

- On peut avoir une *combustion continue* et utiliser des combustibles très *divers*. On peut aussi obtenir la source chaude à partir d’un autre moyen tel que la concentration du rayonnement solaire.
- Le moteur est *inversible* et peut fonctionner en *réfrigérateur* ou en *pompe à chaleur*.

Cycle de Stirling



Exercice : calcul de l'efficacité pour un gaz parfait

- *La quantité de chaleur fournie est de :* $Q_{reçue} = nC_{vm}\,(T_c - T_f) + nR\,T_c \ln V_D / V_C$

- *Le travail est :* $W = -nR(T_c-T_f)\ln(V_D/V_C)$

$$\eta_{\text{Stirling}} = \frac{-W}{Q_{\text{reçue}}} = \frac{R\left(T_c - T_f\right)\ln\frac{V_D}{V_C}}{C_v\left(T_c - T_f\right) + RT_c \ln\frac{V_D}{V_C}}$$

- $Q_{BC} = - Q_{DA} = \Delta U_{BC}$ La quantité de chaleur dissipée sur DA est la même que celle reçue pendant BC.
- *Si, on est capable de recycler* la chaleur entre DA et BC alors l'efficacité s'écrit :

- $\eta_{\text{Stirling}} = - W/Q_{CD} = nR(T_c-T_f)/nRT_c = (T_c – T_f)/T_c$
- $Q_c / T_c + Q_f / T_f = 0$

- $\eta_{\text{Stirling}} = \eta_{\text{Carnot}}$ (en théorie …)

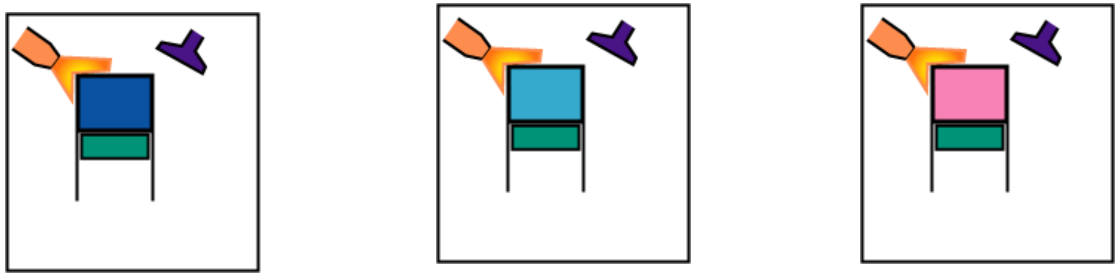
- La contribution majeure de Stirling réside dans l'invention et la réalisation du *régénérateur*.

Cycle de Stirling

Réalisation pratique, différents schémas :

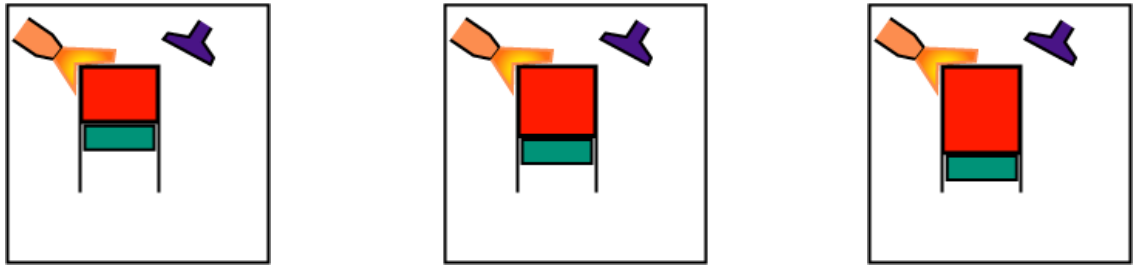
1 - chauffage isochore (à volume constant) :

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.



2 - détente isotherme (à température constante):

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

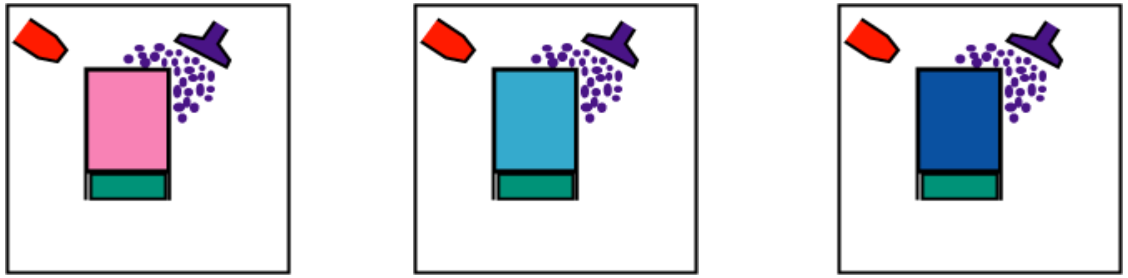


Cycle de Stirling

Réalisation pratique, différents schémas :

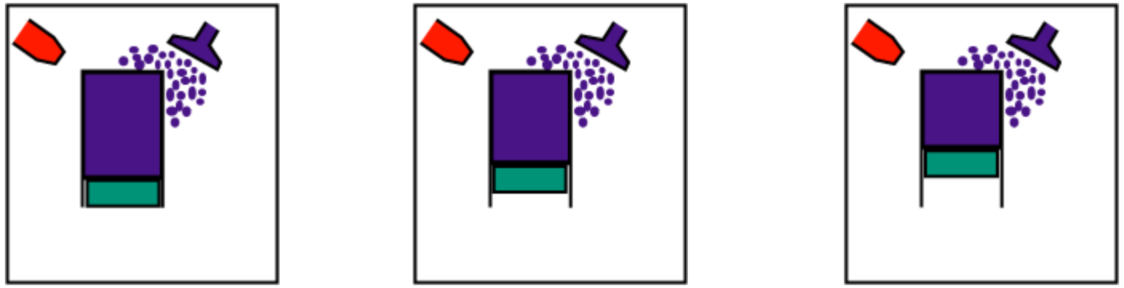
3 - refroidissement isochore :

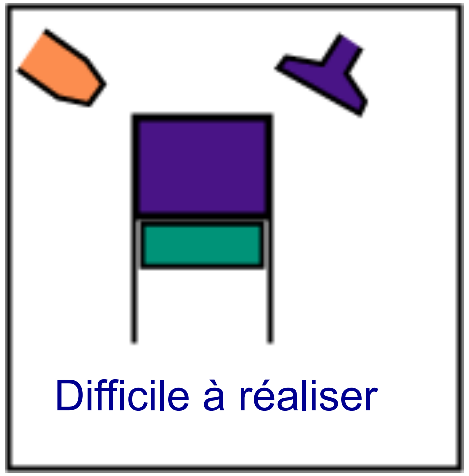
L'eau projetée (la source froide) récupère de l'énergie thermique.
La température et la pression diminuent pendant cette phase.

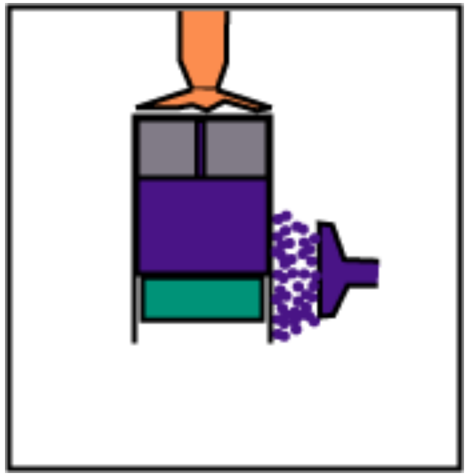


4. une compression isotherme :

La pression du gaz augmente au fur et à mesure que son volume diminue. On doit fournir de l'énergie mécanique au gaz pendant cette période.



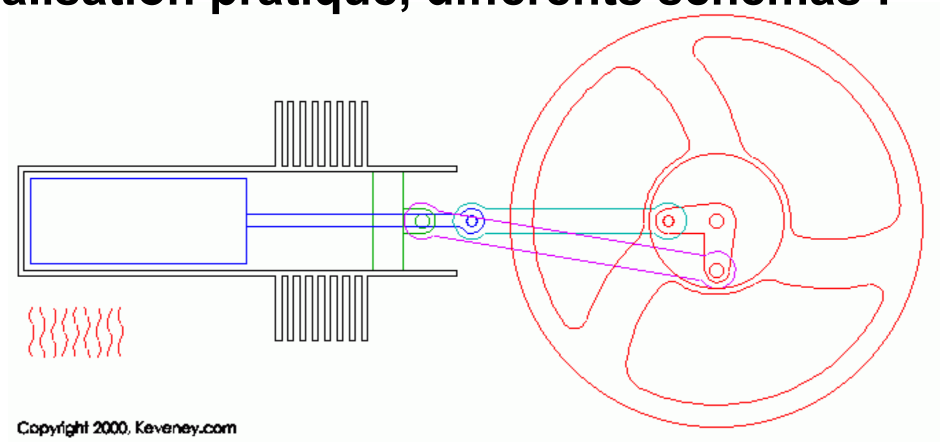


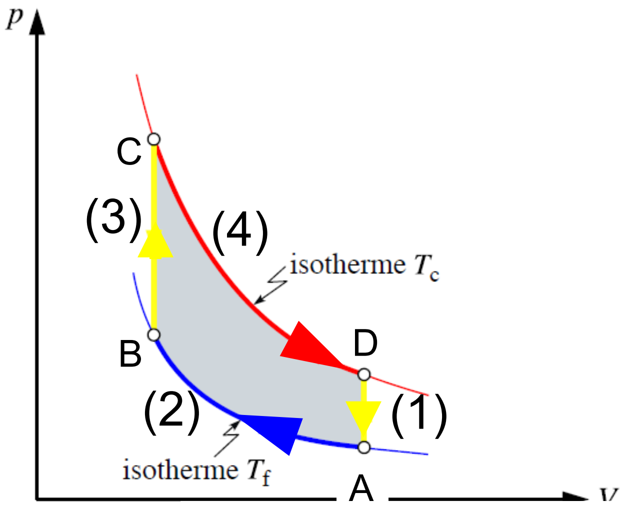


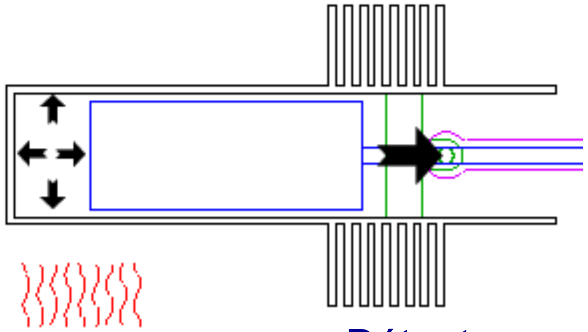
On préfère garder les sources chaudes et froides en continu et déplacer le gaz vers les sources avec un piston interne

Cycle de Stirling

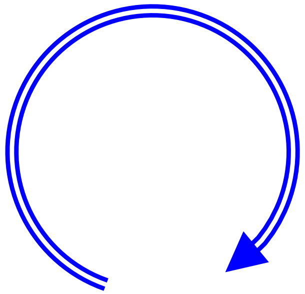
Réalisation pratique, différents schémas :

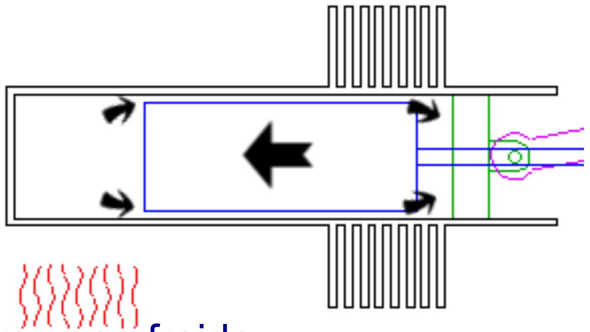




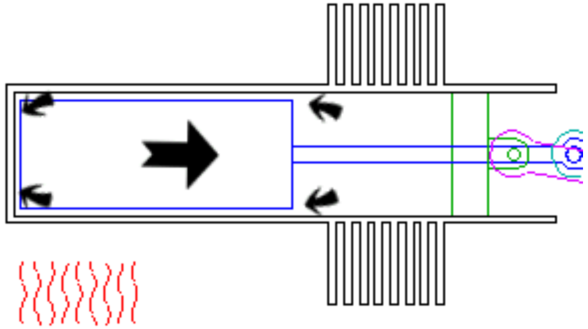


Détente gaz chaud

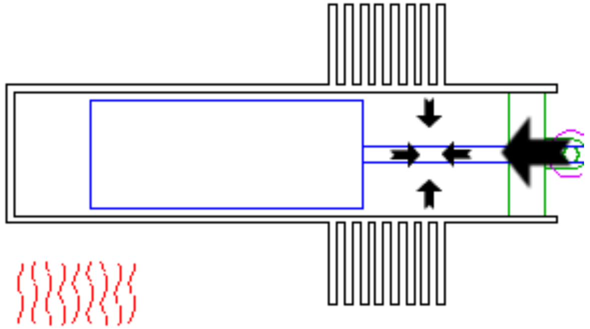




Transfert vers zone froide

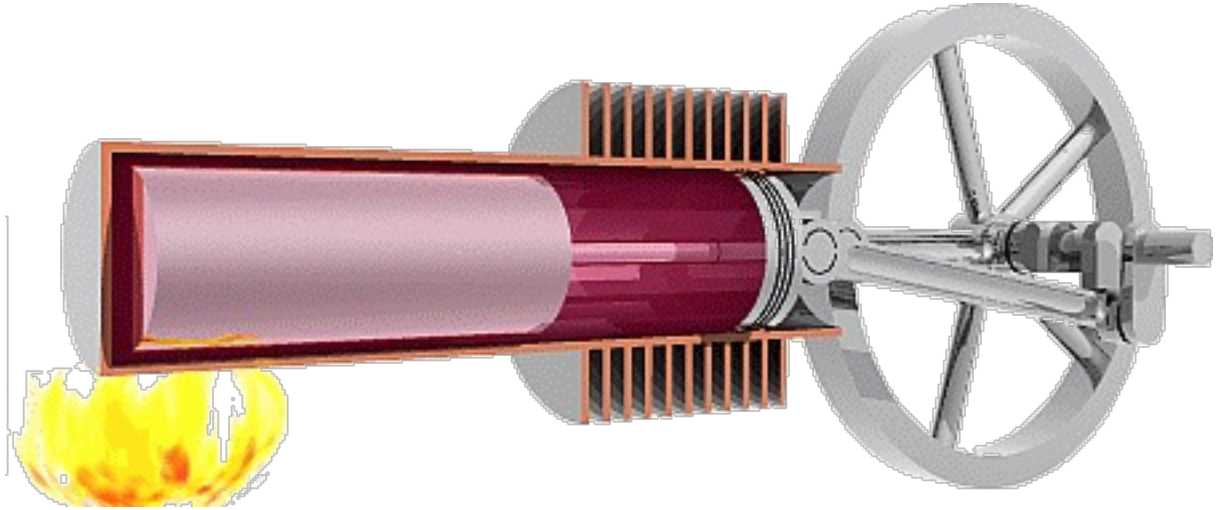


Transfert vers zone chaude



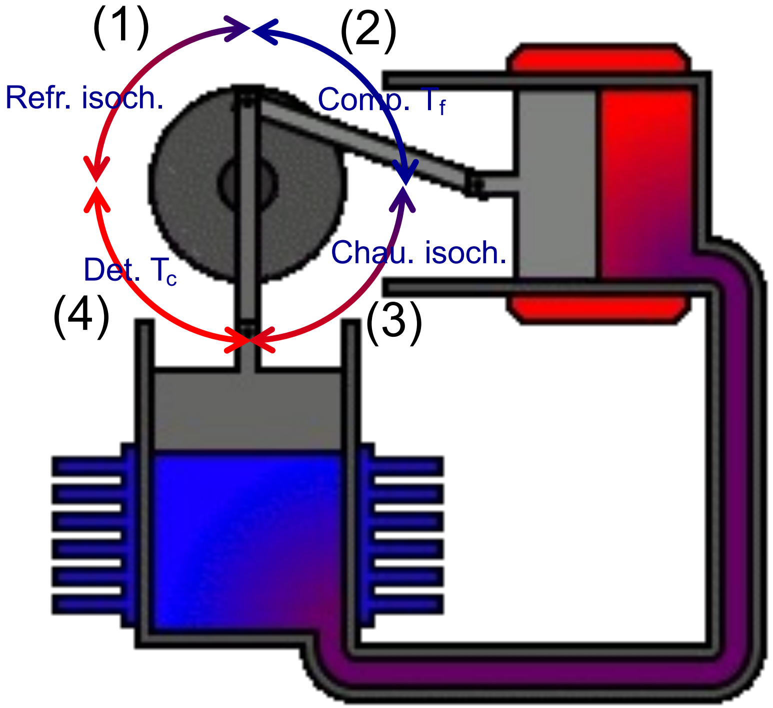
Compression gaz froid

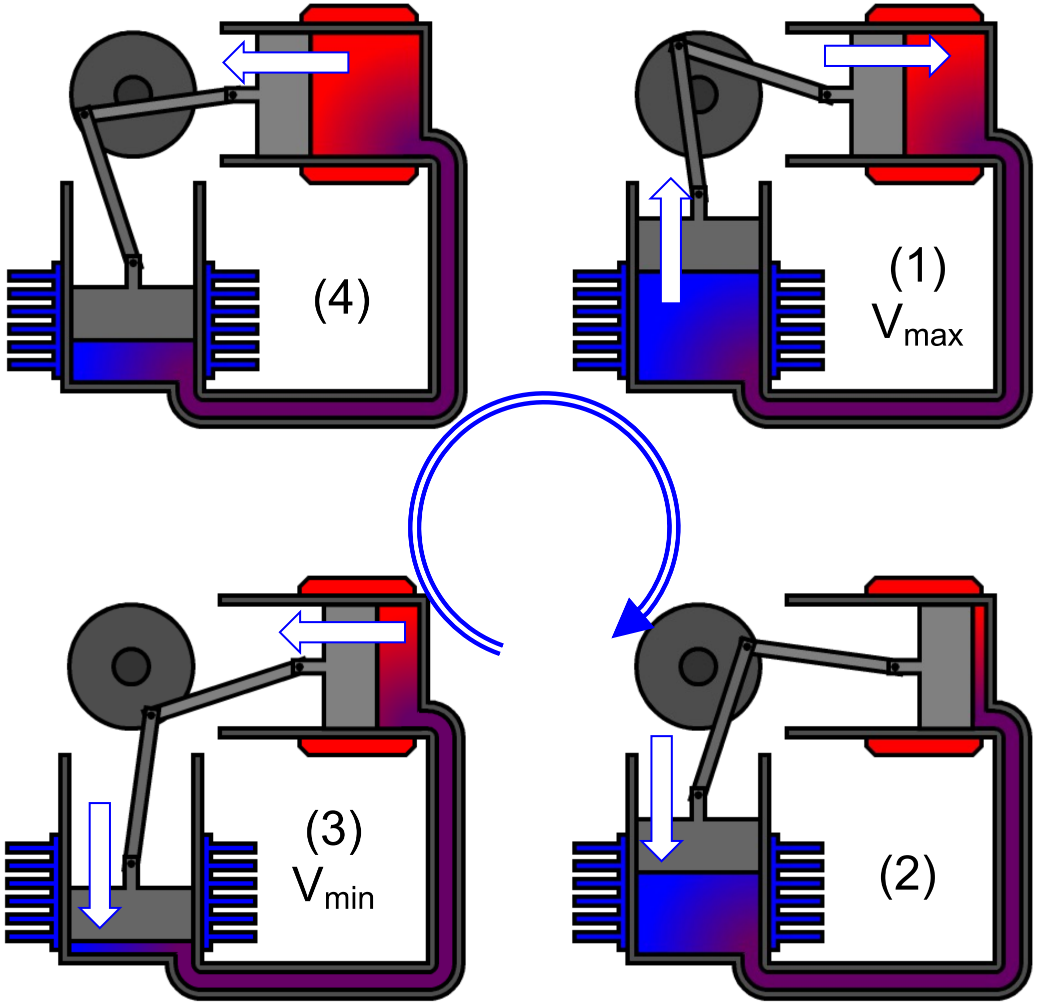
Cycle de Stirling



Cycle de Stirling

Réalisation pratique, différents schémas :





Source : wikipedia

L'essentiel du cours 8

1. Il semble que deux sources de chaleur à deux températures différentes soient nécessaires pour produire du travail en continu.

2. Cycle de Carnot :
   - 2 transformations quasi-statiques adiabatiques.
   - 2 transformations quasi-statiques isothermes.

3. Cycle de Stirling :
   - 2 transformations quasi-statiques isochores.
   - 2 transformations quasi-statiques isothermes.

L'essentiel du cours 8

4 Pour les cycles de Carnot et Stirling (avec régénérateur) effectués avec un gaz parfait :

- Relation entre échanges de chaleur et températures durant le cycle.

$$\boxed{\frac{Q_c}{T_c}+\frac{Q_f}{T_f}=0}$$

- Efficacité pour un cycle moteur.

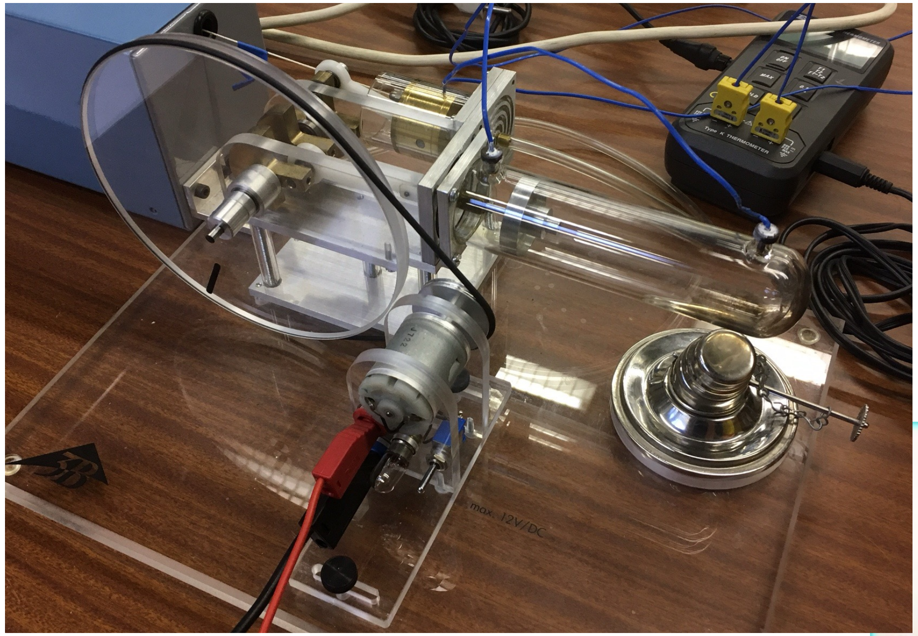
$$\boxed{\eta_{\text{Carnot}}=\frac{-W}{Q_c}=\frac{T_c-T_f}{T_c}}$$

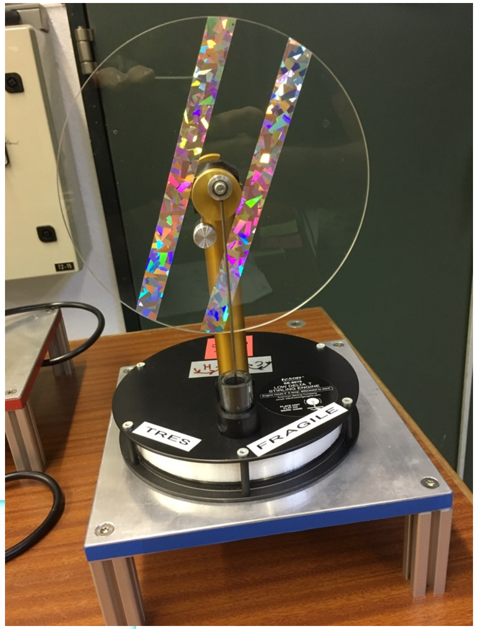
5 Les cycles de Carnot et de Stirling sont inversibles et peuvent être utilisés avec un apport de travail (cycle résistant) pour engendrer un transfert de chaleur du froid vers le chaud :

- Réfrigérateur.
- Pompe à chaleur.
- On définit une efficacité ou un coefficient de performance adaptée à chacun de ces usages.

Expériences de cours

Expériences auditoires EPFL : auditoires-physique.epfl.ch
Chaine YouTube : www.youtube.com/channel/UC4htKGfCRRkFyIqAo8DGocg





Moteurs de Stirling