ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

26 mai 2009

cours de la semaine # 14a

Bienvenue au

EPFL - LABORATOIRE
D'ASTROPHYSIQUE

Cours de physique générale

Physique II pour étudiants de première année en section de mathématiques

Prof. Georges Meylan

Laboratoire d'astrophysique

Site web du laboratoire et du cours :

http://lastro.epfl.ch

Thermodynamique

Chapitre (vi)

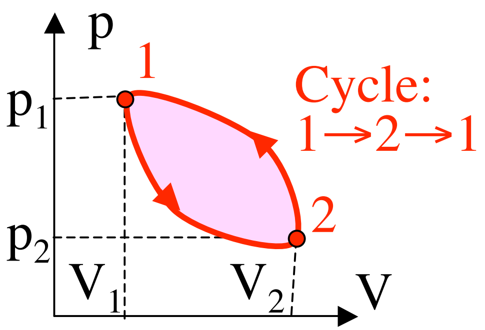
Deuxième principe de la thermodynamique

(suite et fin)

dup

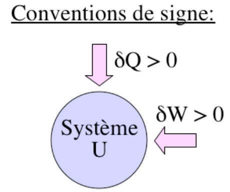
W et Q échangés lors d'un cycle quasi-statique

- Cycle = transformation où l'état initial et l'état final du système sont confondus



$$W_{cycle} = -\oint_{1\to 2\to 1} p\, dV$$

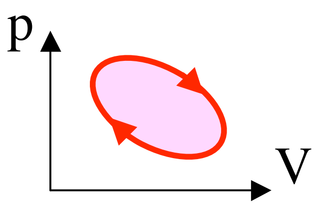
$$|W_{cycle}| = \begin{cases} \text{aire délimitée par le} \\ \text{cycle dans le plan } p - V \end{cases}$$

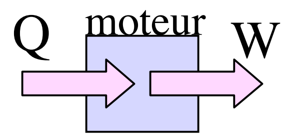


$$\Delta U_{cycle} = 0 = W_{cycle} + Q_{cycle} \quad \Rightarrow \quad \boxed{Q_{cycle} = -W_{cycle}}$$

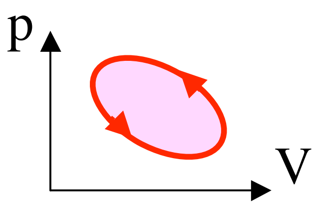
- Machine thermique = système thermodynamique fonctionnant sur un cycle répétitif

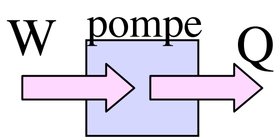
  - **Moteur :**
    fournit du travail : $W_{cycle} < 0$
    absorbe de la chaleur : $Q_{cycle} > 0$





  - **Pompe à chaleur ou réfrigérateur :**
    absorbe du travail : $W_{cycle} > 0$
    fournit de la chaleur : $Q_{cycle} < 0$

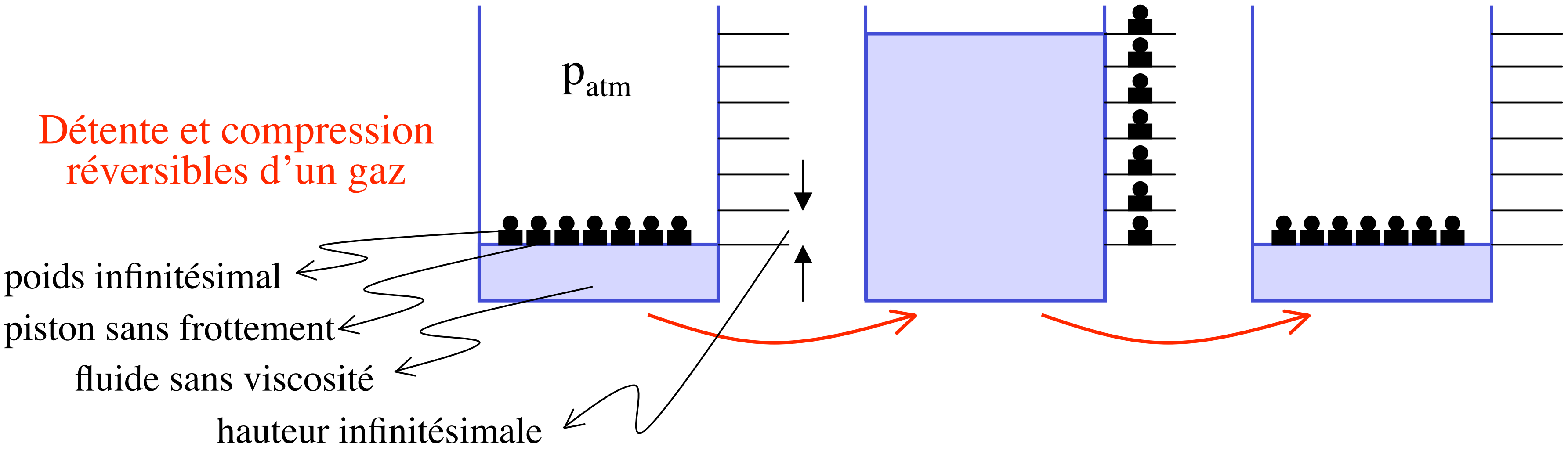




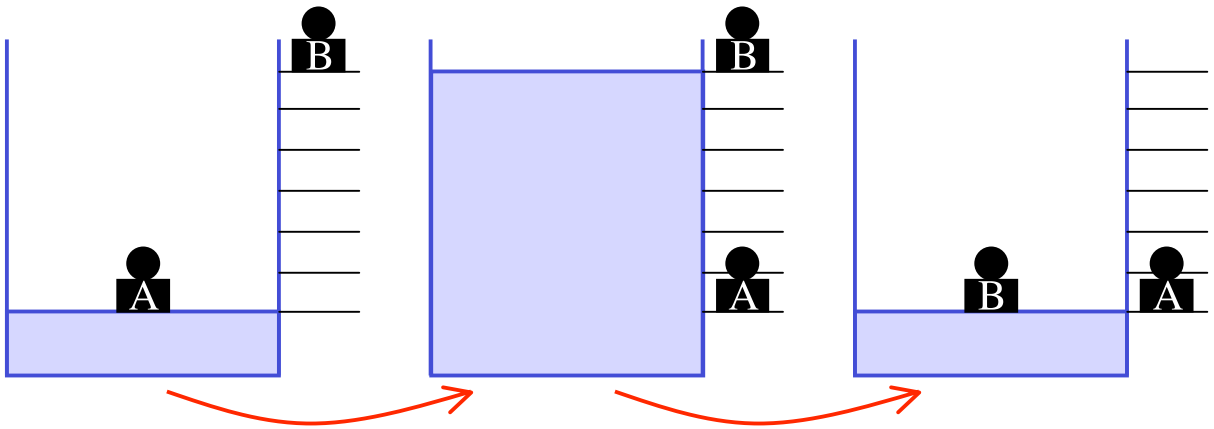
Transformations réversibles et irréversibles

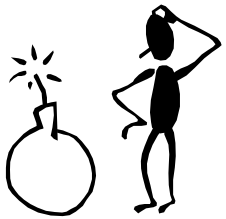
- Au terme d'une transformation **réversible** (**irréversible**), il est **possible** (**impossible**) de ramener le système et le milieu extérieur à leurs états initiaux
- Transformation réversible = transformation quasistatique sans effet dissipatif

Détente et compression réversibles d'un gaz

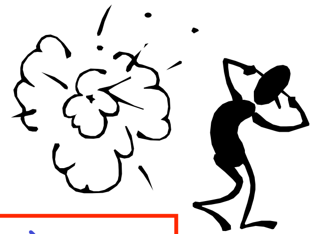


Détente et compression irréversibles d'un gaz



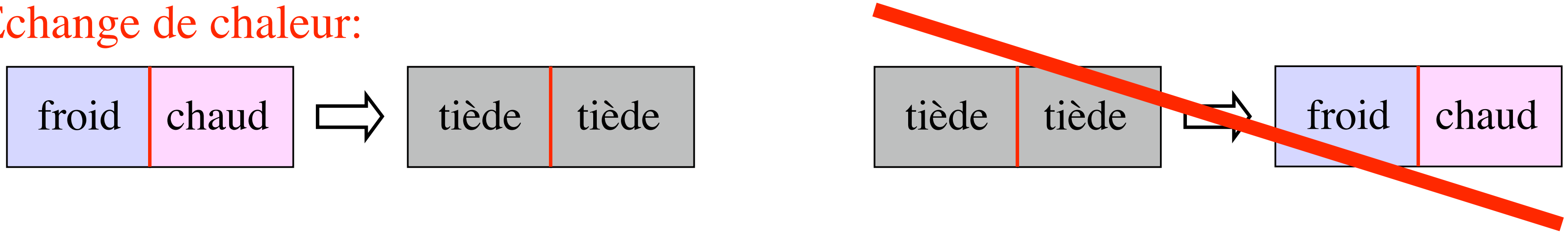


Irréversibilité

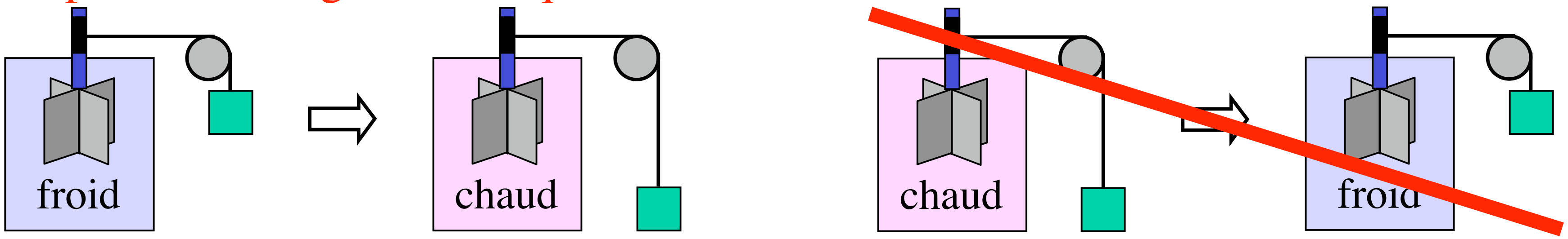


Tous les processus macroscopiques réels (non-idéaux) sont irréversibles ⇔ L'évolution des systèmes macroscopiques se fait dans un sens privilégié !

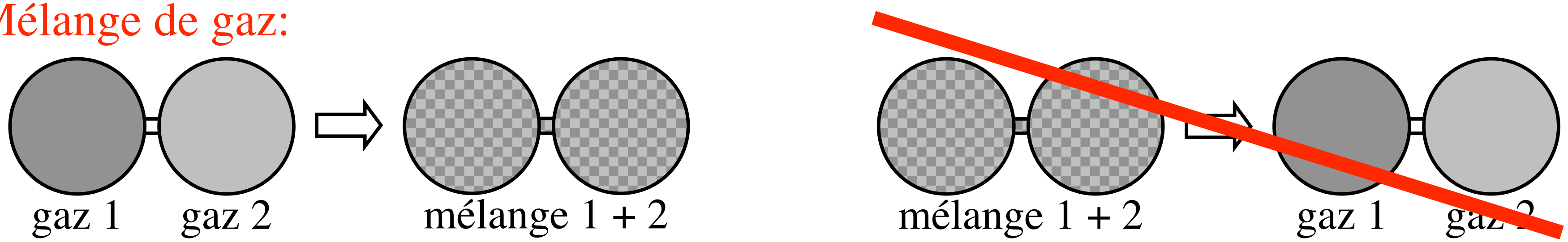
– Echange de chaleur:



– Dissipation d'énergie mécanique en chaleur:



– Mélange de gaz:



Deuxième principe de la thermodynamique

- Plusieurs énoncés (équivalents) qui tous expriment …
  … l'irréversibilité des processus macroscopiques
  (sens privilégié de l'évolution, « flèche du temps »)
  … le fait que certains processus de transfert de travail et de chaleur ne sont pas permis même s'ils satisfont au premier principe
- Enoncés historiques concernant les machines thermiques :
  - « Il n'existe pas de machine thermique qui … »
  - Impossibilité du mouvement perpétuel
- Enoncés plus axiomatiques basés sur les notions d'entropie, d'ordre et de désordre :
  - « L'entropie ne fait que croître »
  - « L'évolution spontanée va de l'ordre vers le désordre »

Le casino de la thermodynamique

Rules:
1. You cannot win
2. You cannot break even
3. You cannot stop playing the game

Deuxième principe de la thermodynamique

- Plusieurs énoncés (équivalents) qui tous expriment …
  … l'irréversibilité des processus macroscopiques
  (sens privilégié de l'évolution, « flèche du temps »)
  … le fait que certains processus de transfert de travail et de chaleur ne sont pas permis même s'ils satisfont au premier principe
- Enoncés historiques concernant les machines thermiques :
  - « Il n'existe pas de machine thermique qui … »
  - Impossibilité du mouvement perpétuel
- Enoncés plus axiomatiques basés sur les notions d'entropie, d'ordre et de désordre :
  - « L'entropie ne fait que croître »
  - « L'évolution spontanée va de l'ordre vers le désordre »
- Le deuxième principe de la thermodynamique établit **l'irréversibilité des phénomènes physiques, en particulier lors des échanges thermiques**.
  - Principe d'évolution énoncé pour la première fois en 1924 par Sadi Carnot. Nombreuses généralisations et formulations successives par Clapeyron (1834), Clausius (1850), Lord Kelvin, Ludwig Boltzmann en 1873 et Max Planck à la fin du XIX^{e} et au début du XX^{e} siècle.

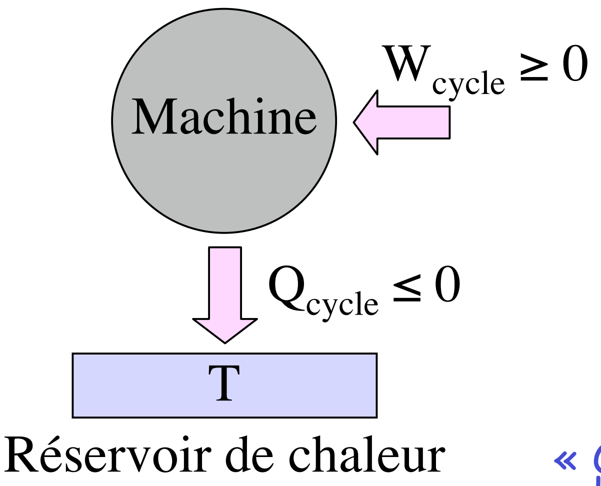
Machine monotherme

- **Définitions** :
  - Réservoir de chaleur = source de chaleur dont la température reste constante, quelle que soit la quantité de chaleur qu'on lui prend ou qu'on lui apporte
  - Machine monotherme = machine thermique qui, au cours de son cycle, ne peut échanger de la chaleur qu'avec un seul réservoir de chaleur

Une machine monotherme ne peut pas produire de travail

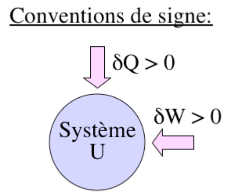
2ème principe de la thermodynamique (énoncé de Kelvin)

$$\boxed{dU = \delta Q + \delta W}$$



Le 1er principe implique $W_{cycle} = -Q_{cycle}$ (car $\Delta U_{cycle} = 0$)

Le 2ème principe exclut $W_{cycle} < 0$ et $Q_{cycle} > 0$



Donc:

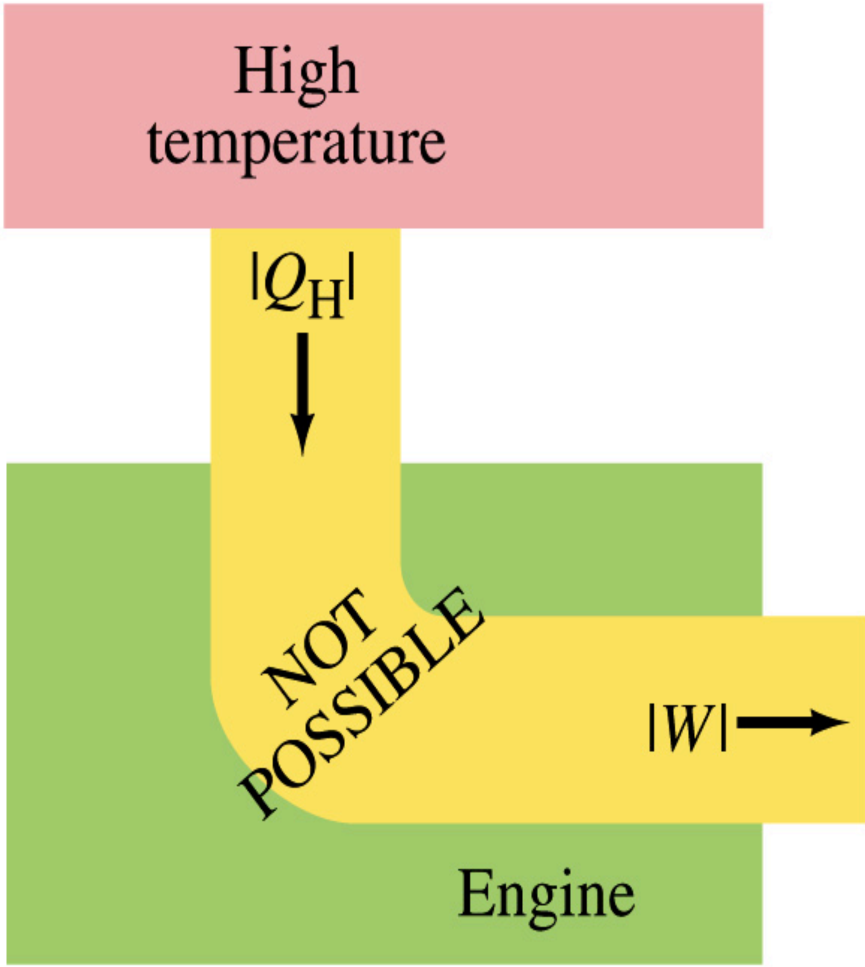
soit $W_{cycle} > 0$ et $Q_{cycle} < 0$ (cycle irréversible)

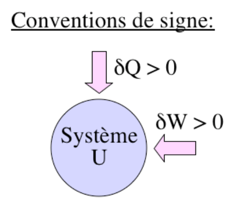
soit $W_{cycle} = 0$ et $Q_{cycle} = 0$ (cycle réversible)

« On ne peut pas construire de bateau qui se propulse grâce à la chaleur tirée de la mer (et sans autre échange de chaleur) »

Machine monotherme

impossible





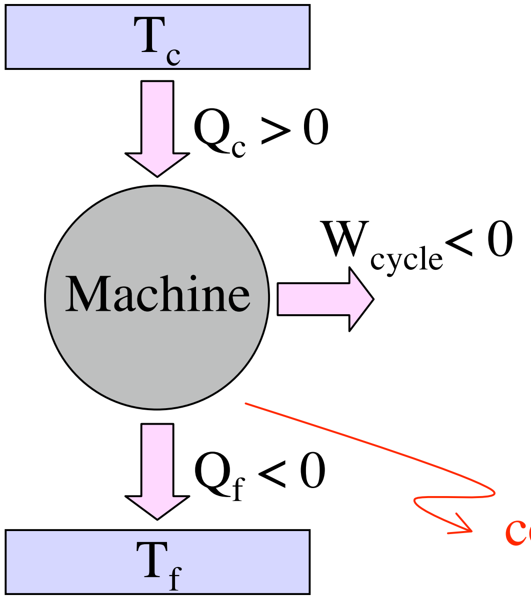
Machine ditherme (moteur)

- **Définition** :

Machine ditherme = machine thermique qui, au cours de son cycle, peut échanger de la chaleur avec deux réservoirs de chaleur à des températures différentes (un réservoir chaud à T_c et un réservoir froid à $T_f < T_c$)

> Une machine ditherme ne peut produire du travail qu'à condition de prendre de la chaleur au réservoir chaud et d'en donner une partie au réservoir froid

2ème principe de la thermodynamique (énoncé de Carnot)



Le 1er principe implique $W_{cycle} + Q_c + Q_f = \Delta U_{cycle} = 0$

Le 2ème principe implique $Q_c > 0$ et $Q_f < 0$ si $W_{cycle} < 0$

Note :
Si $W_{cycle} < 0$ et $Q_f > 0$, alors on mettrait un contact diathermique entre les deux réservoirs pour transférer Q_f du réservoir chaud vers le réservoir froid ; le bilan global serait celui d'une machine monotherme qui puiserait $Q_f + Q_c$ au réservoir chaud pour produire du travail, en contradiction avec l'énoncé de Kelvin.

cette machine est un moteur de rendement $\eta<1$ défini par :

Efficacité
Rendement

$$\equiv \eta = \frac{|\text{travail produit}|}{|\text{chaleur prise au réservoir chaud}|} = \frac{-W_{cycle}}{Q_c} = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|}$$

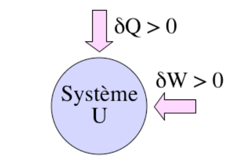
Machine ditherme (frigo ou pompe)

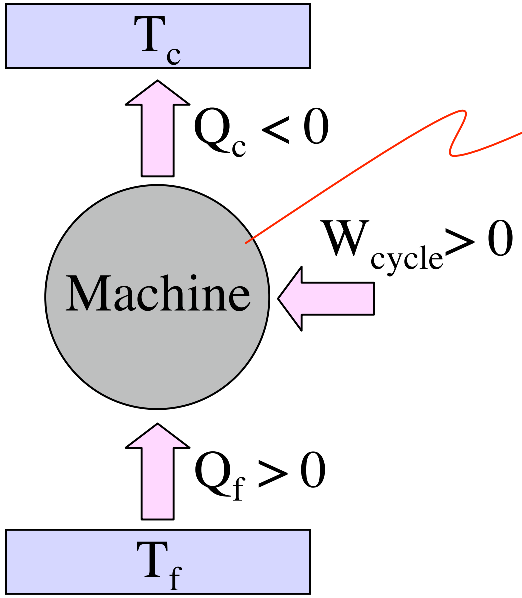
Une machine ne peut pas transférer de la chaleur d'un réservoir froid à un réservoir chaud sans recevoir du travail

2ème principe de la thermodynamique (énoncé de Clausius)

Le 1er principe implique $W_{cycle} + Q_c + Q_f = \Delta U_{cycle} = 0$

Le 2ème principe implique $W_{cycle} > 0$ si $Q_c < 0$





Cette machine est :

– soit un réfrigérateur,
avec une efficacité de refroidissement ε_f définie par :

$$\varepsilon_f = \frac{|\text{chaleur prise au réservoir froid}|}{|\text{travail reçu}|}$$

$$= \frac{Q_f}{W_{cycle}} = \frac{Q_f}{-Q_c - Q_f} = \frac{1}{|Q_c|/|Q_f| - 1} = \frac{1-\eta}{\eta}$$

– soit une pompe à chaleur,
avec une efficacité de chauffage $\varepsilon_c > 1$ définie par :

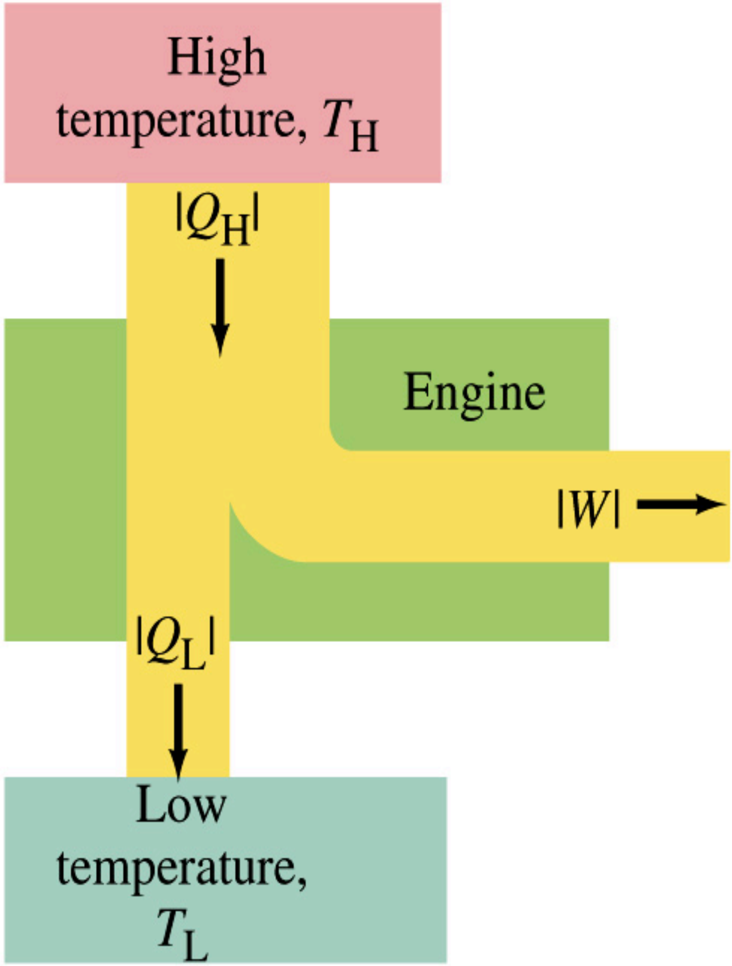
$$\varepsilon_c = \frac{|\text{chaleur donnée au réservoir chaud}|}{|\text{travail reçu}|}$$

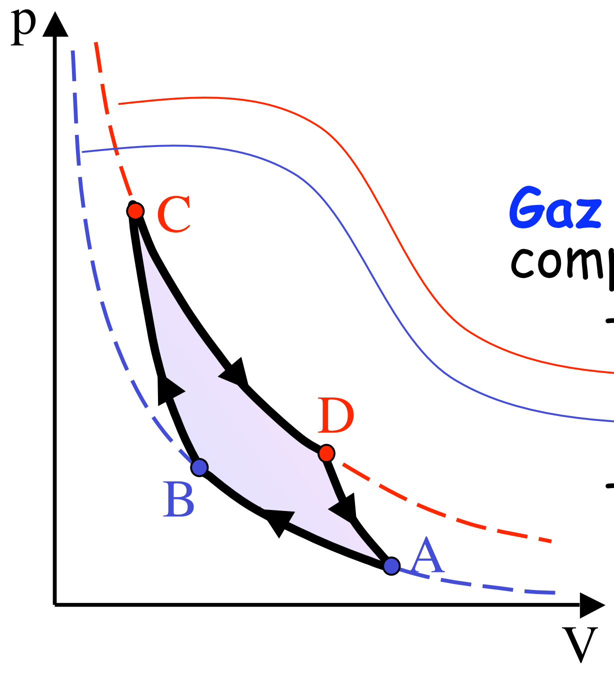
$$= \frac{-Q_c}{W_{cycle}} = \frac{Q_c}{Q_c + Q_f} = \frac{1}{1 - |Q_f|/|Q_c|} = \frac{1}{\eta}$$

Note :
Un frigo/pompe (moteur) fonctionnant sur un cycle réversible peut être inversé pour fonctionner comme moteur (frigo/pompe)

Machine ditherme

possible





Cycle de Carnot

moteur parfait à transformation réversible

Gaz parfait effectuant un cycle réversible ditherme composé de :

- deux transformations isothermes
  - isotherme T_c du réservoir chaud
  - isotherme T_f du réservoir froid
- deux transformations adiabatiques

$$T\,V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

$$\left.\begin{aligned} T_f V_B^{\gamma-1} &= T_c V_C^{\gamma-1} \\ T_c V_D^{\gamma-1} &= T_f V_A^{\gamma-1} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{T_f}{T_c} = \frac{V_C^{\gamma-1}}{V_B^{\gamma-1}} = \frac{V_D^{\gamma-1}}{V_A^{\gamma-1}} \Rightarrow \frac{V_D}{V_C} = \frac{V_A}{V_B}$$

Transformation	Travail échangé	Chaleur échangée	ΔU
isotherme $A \rightarrow B$	$-nRT_f \ln\frac{V_B}{V_A} > 0$	$Q_f = nRT_f \ln\frac{V_B}{V_A} < 0$	0
adiabatique $B \rightarrow C$	$\frac{\nu}{2} nR(T_c - T_f) > 0$	0	$\frac{\nu}{2} nR(T_c - T_f) > 0$
isotherme $C \rightarrow D$	$-nRT_c \ln\frac{V_D}{V_C} < 0$	$Q_c = nRT_c \ln\frac{V_D}{V_C} > 0$	0
adiabatique $D \rightarrow A$	$\frac{\nu}{2} nR(T_f - T_c) < 0$	0	$\frac{\nu}{2} nR(T_f - T_c) < 0$
cycle complet	$nR(T_c - T_f)\ln\frac{V_B}{V_A} < 0$	$nR(T_f - T_c)\ln\frac{V_B}{V_A} > 0$	0

Rappel

Travail échangé (transformations quasi-statiques)

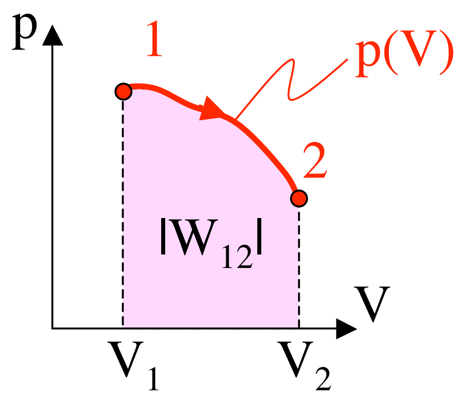
- Comme le gaz est toujours à l'équilibre, on a : p_{ext} = pression p du gaz

$$\boxed{\delta W = -p_{ext} dV = -p\,dV}$$

- On peut représenter la transformation de 1 à 2 par une courbe dans le diagramme p-V :

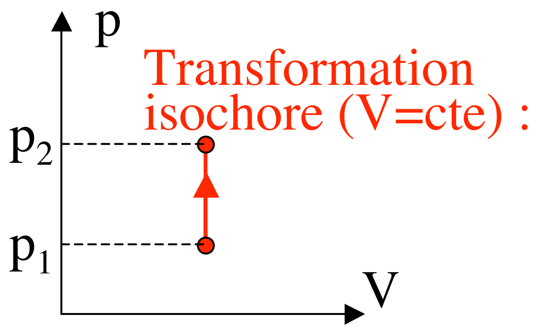
$$\boxed{W_{12} = \int_1^2 \delta W = -\int_1^2 p\,dV}$$

$$|W_{12}| = \begin{cases} \text{aire sous la} \\ \text{courbe } p(V) \end{cases}$$

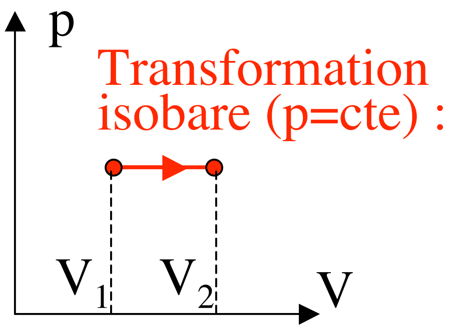


Note: W_{12} dépend du chemin parcouru entre 1 et 2 !

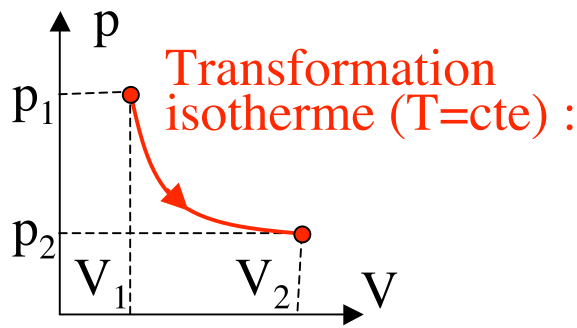
- Exemples simples:



$$W_{12} = 0$$



$$W_{12} = -p(V_2 - V_1)$$



$$W_{12} = -\int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V}\,dV = -nRT \ln\frac{V_2}{V_1}$$

gaz parfait

Rendement du cycle de Carnot

- La machine de Carnot est réversible ($Q_f \rightarrow -Q_f$, $Q_c \rightarrow -Q_c$, $W_{cycle} \rightarrow -W_{cycle}$)
  - peut fonctionner aussi bien en moteur qu'en réfrigérateur ou pompe à chaleur

$$\left.\begin{aligned} |Q_f| &= nRT_f \ln(V_A/V_B) \\ |Q_c| &= nRT_c \ln(V_D/V_C) = nRT_c \ln(V_A/V_B) \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = \frac{T_f}{T_c}$$

$$|W_{cycle}| = |Q_f + Q_c| = nR(T_c - T_f)\ln(V_A/V_B)$$

- Rendement de Carnot

Efficacité = $\eta = 1 - \dfrac{|Q_f|}{|Q_c|} \Rightarrow \boxed{\eta_{Carnot} = 1 - \dfrac{T_f}{T_c}}$

Théorème de Carnot

Toutes les machines dithermes réversibles (irréversibles) ont un rendement égal (inférieur) à celui du cycle de Carnot, indépendamment de la nature du système et de la forme du cycle

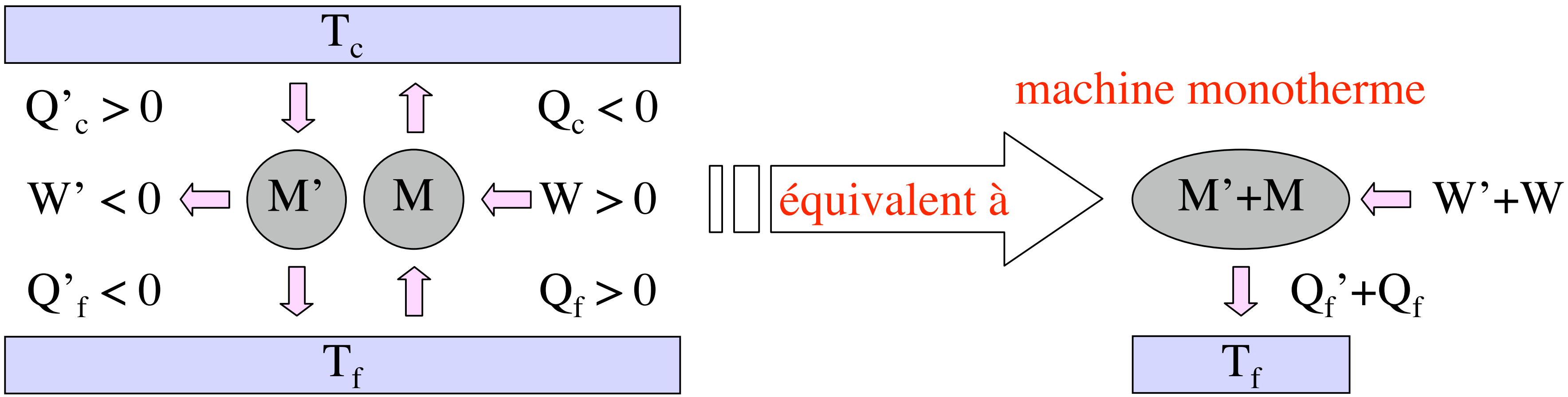
Sadi Carnot
1796–1832

Nicolas Léonard ≠ Marie François
physicien politicien

Remarque : en 1848, Kelvin a utilisé la relation $|Q_f|/|Q_c|=T_f/T_c$ pour définir l'échelle de température absolue

Démonstration du théorème de Carnot

- Soit une machine ditherme M' quelconque
  - fournit du travail en prenant une chaleur $|Q'_c|$ au réservoir chaud
- Machine de Carnot M entre les mêmes réservoirs de chaleur
  - réversible, donc peut fonctionner en réfrigérateur, pour donner une chaleur $|Q_c| = |Q'_c|$ au réservoir chaud



- 2ème principe (énoncé de Kelvin) appliqué au système total :

$$Q'_f + Q_f \leq 0 \quad \Rightarrow \quad -|Q'_f| \leq -|Q_f| \quad \Rightarrow \quad 1 - \frac{|Q'_f|}{|Q'_c|} \leq 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\eta' \leq \eta_{\text{Carnot}}}$$

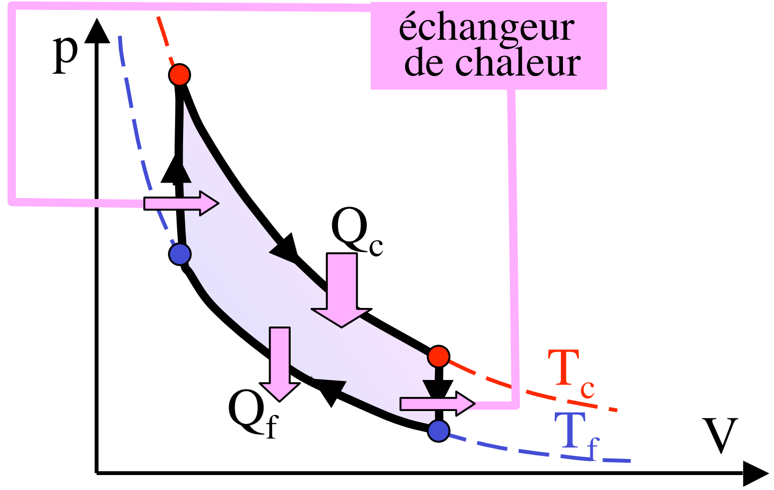
$$\begin{cases} \text{signe } = & \text{si M+M' (c'est-à-dire M') est réversible} \\ \text{signe } < & \text{si M+M' (c'est-à-dire M') est irréversible} \end{cases}$$

Démo : moteur de Stirling # 133

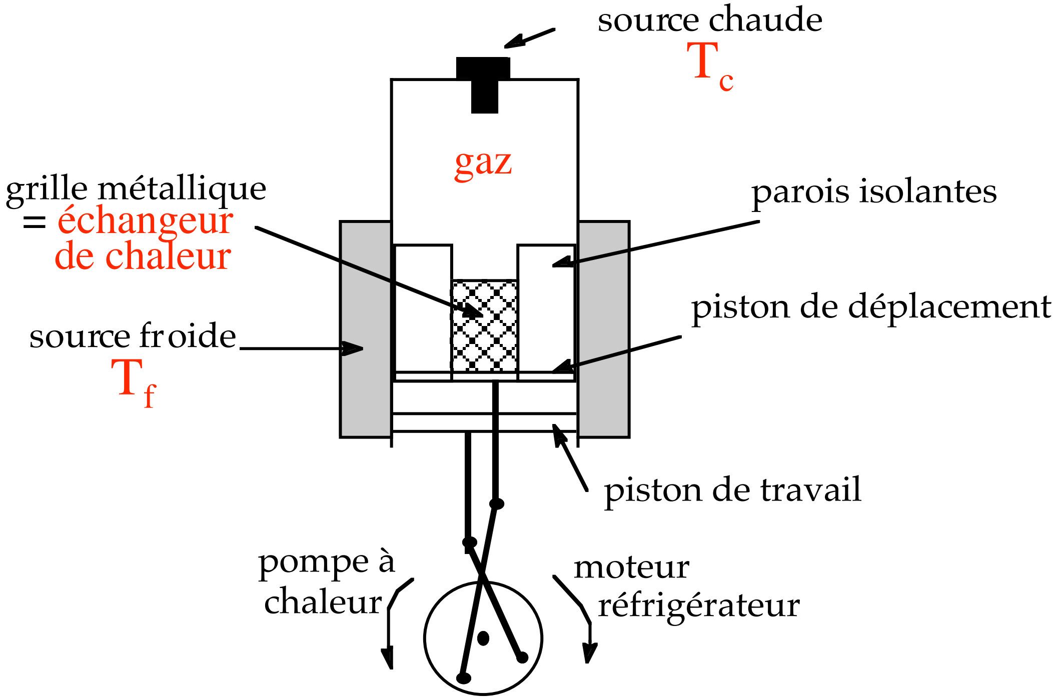
Machine de Stirling

Rev. Robert Stirling
1790–1878

- Un gaz (air) effectue un cycle formé de deux isothermes et deux isochores
- Le gaz passe à travers un échangeur de chaleur pendant les isochores (grande capacité calorifique, mais faible conductivité thermique)

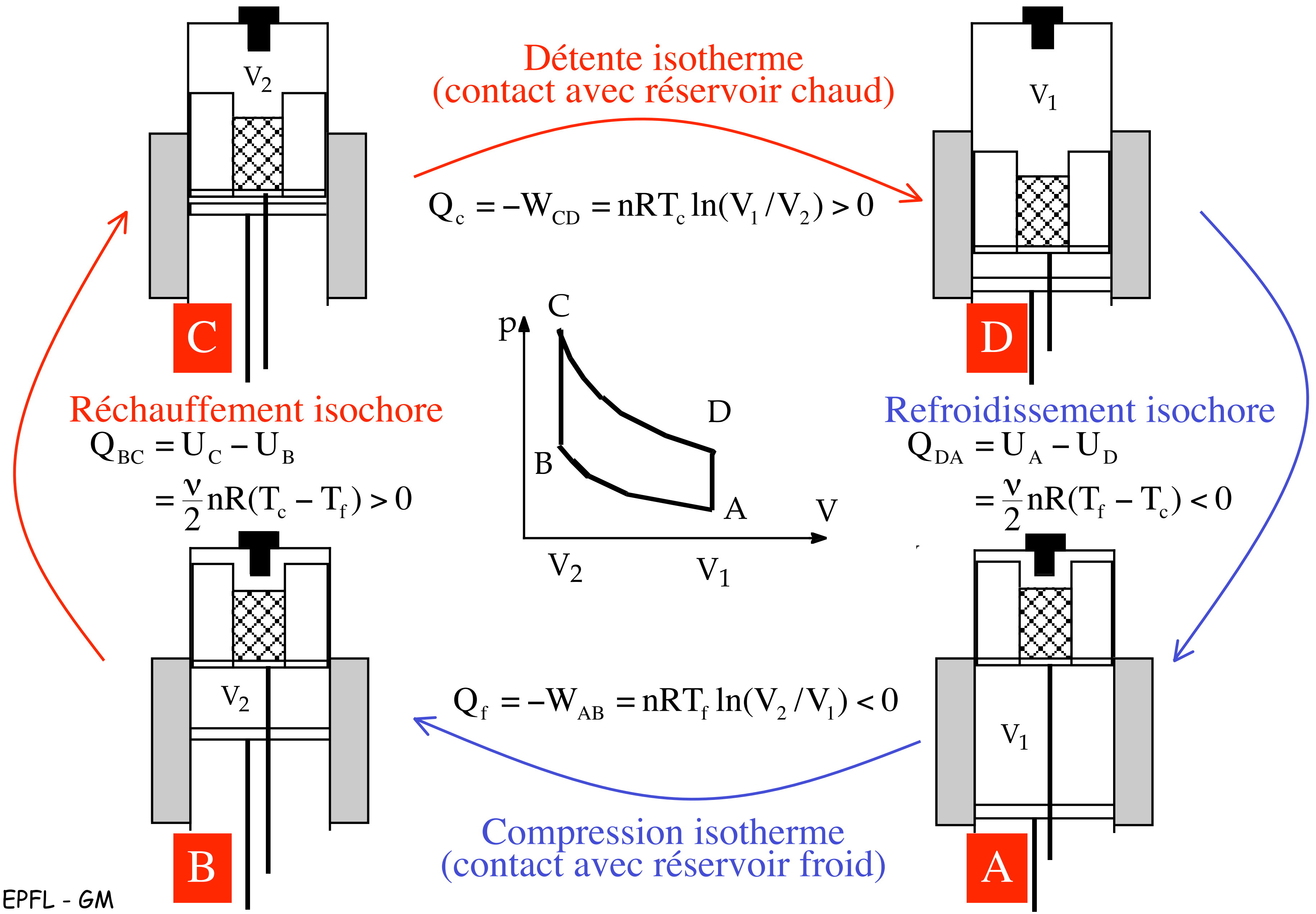


- Gaz + échangeur de chaleur
  = machine ditherme (entre T_c et T_f)



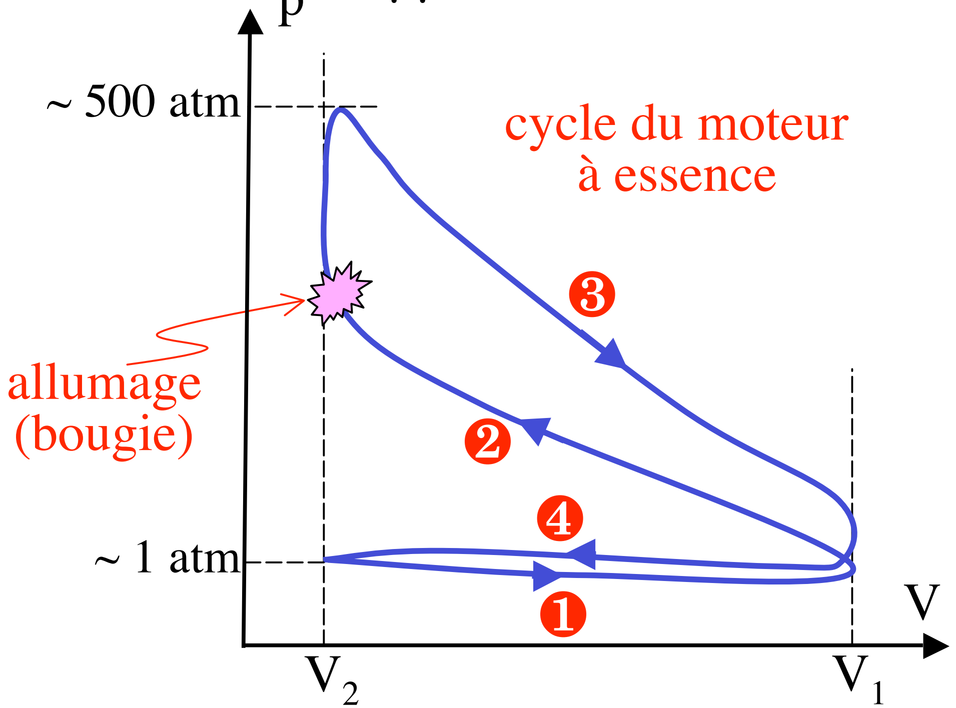
- Rendement : $\eta = 1 - \dfrac{|Q_f|}{|Q_c|}$
- Si le cycle est réversible : $\eta = \eta_{Carnot} = 1 - \dfrac{T_f}{T_c}$

Machine de Stirling (suite)



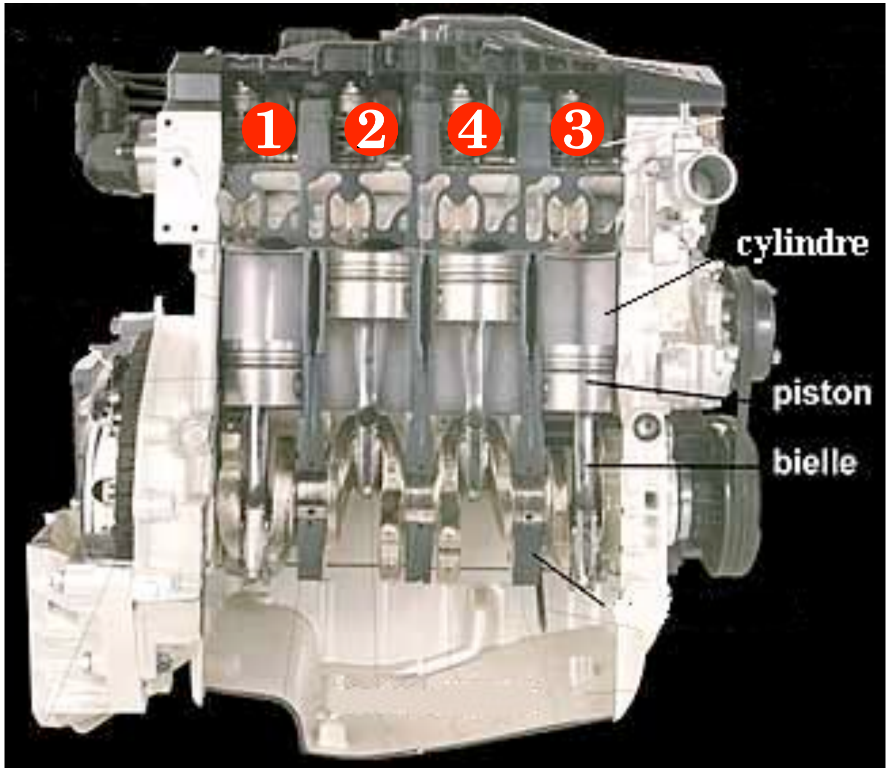
Moteur à explosion

- Moteur à 4 temps :
  ❶ admission mélange air-essence
  ❷ compression
  ❸ détente (temps moteur)
  ❹ échappement



$$r = \frac{V_1}{V_2} = \text{ taux de compression}$$

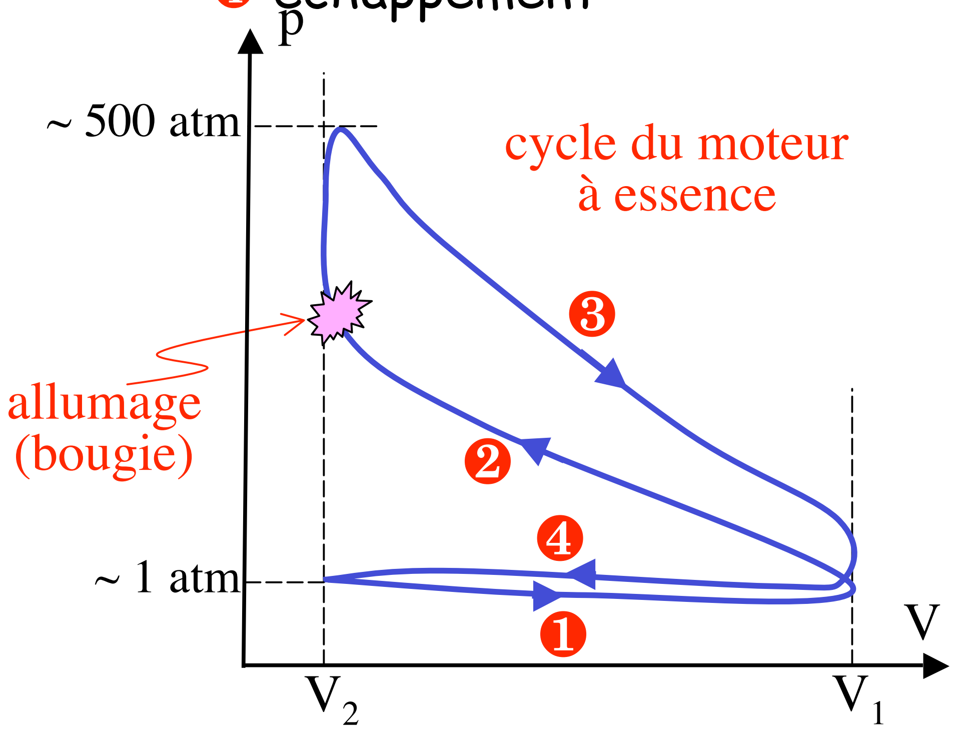
- Moteur à combustion interne :
  - la chaleur est tirée de l'explosion (combustion) d'un mélange air-essence



r < 10, pour éviter un auto-allumage prématuré dû à l'échauffement produit par la compression

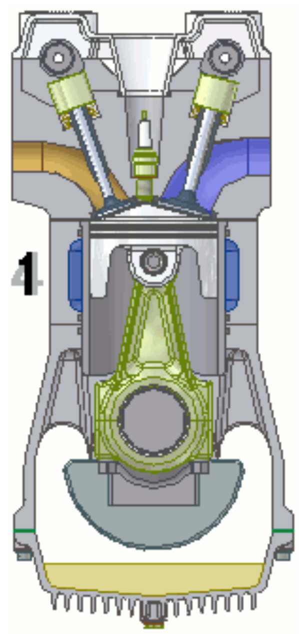
Moteur à explosion

- Moteur à 4 temps :
  1. admission mélange air-essence
  2. compression
  3. détente (temps moteur)
  4. échappement



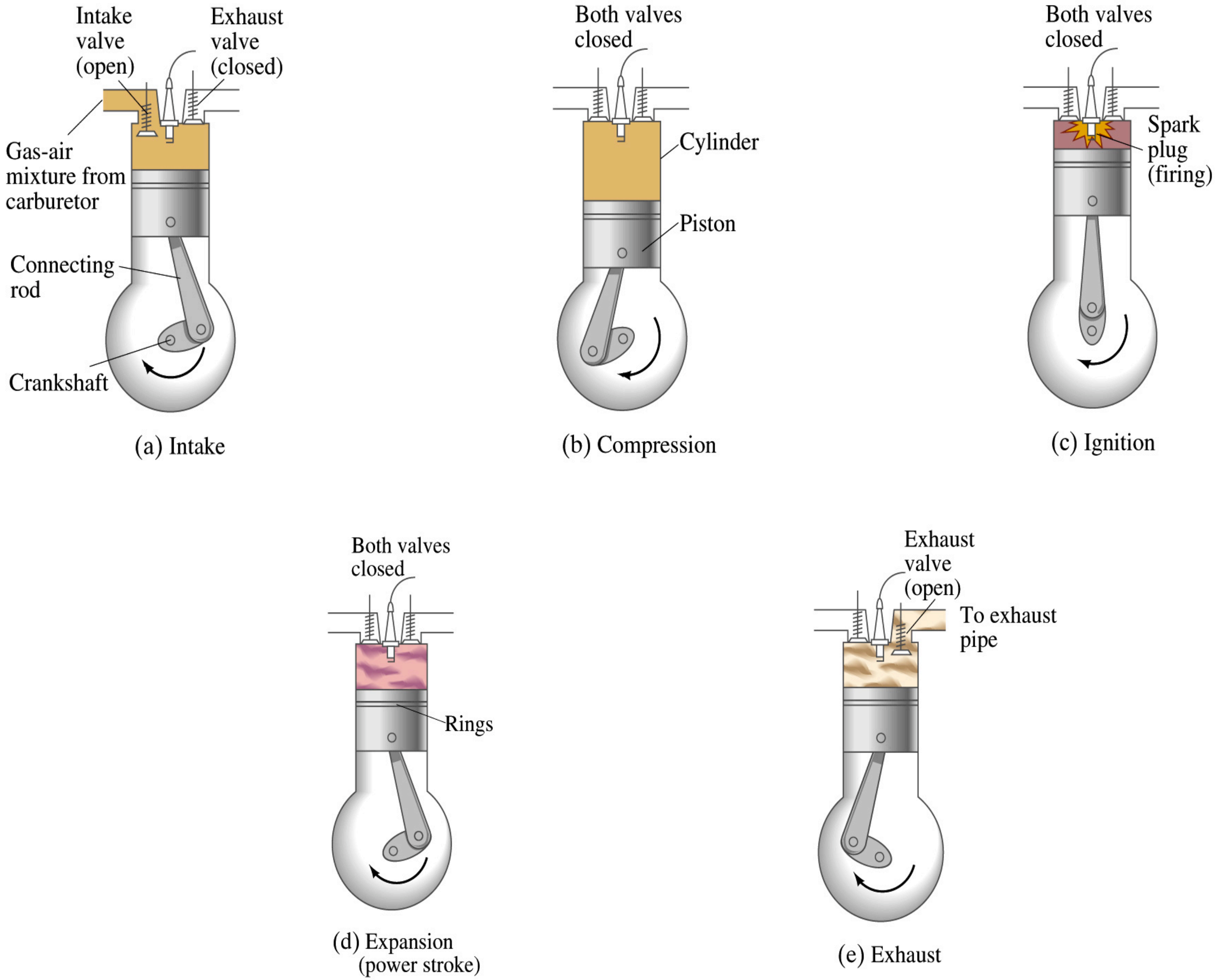
$$r = \frac{V_1}{V_2} = \text{ taux de compression}$$

- Moteur à combustion interne :
  - la chaleur est tirée de l'explosion (combustion) d'un mélange air-essence



r < 10, pour éviter un auto-allumage prématuré dû à l'échauffement produit par la compression

Moteur à explosion (a,b,c,d,e)



Moteur à explosion (suite)

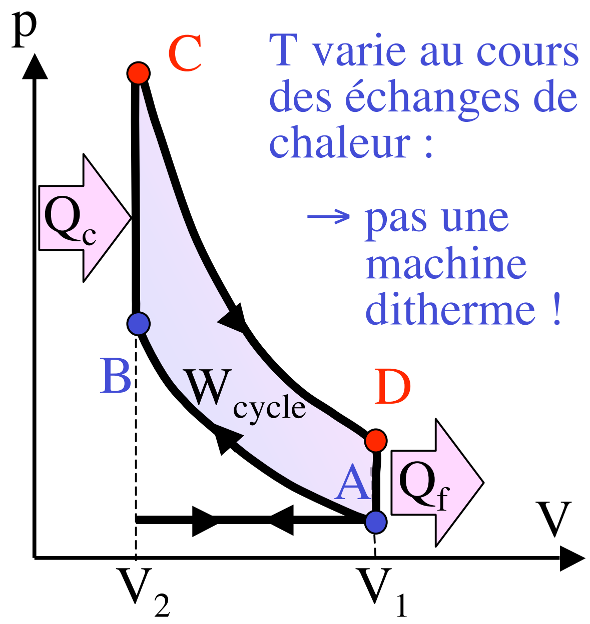
- Cycle idéal (d'Otto ou de Beau de Rochas) :
  - deux adiabatiques et deux isochores réversibles
  - rendement théorique :

$$\eta = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{|U_A - U_D|}{|U_C - U_B|} = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}$$

$$\left.\begin{aligned} T_A V_1^{\gamma-1} &= T_B V_2^{\gamma-1} \\ T_D V_1^{\gamma-1} &= T_C V_2^{\gamma-1} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B} = \frac{V_2^{\gamma-1}}{V_1^{\gamma-1}} = \frac{T_A}{T_B} = \frac{T_D}{T_C}$$

$$\eta = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = 1 - \frac{T_A}{T_B} = 1 - \frac{T_D}{T_C} < 1 - \frac{T_A}{T_C} = \eta_{\text{Carnot}}(T_A, T_C)$$

$$\eta = 56\% \text{ pour } r = V_1/V_2 = 8 \text{ et } \gamma = 1.4 \text{ (valeurs typiques)}$$



T varie au cours des échanges de chaleur :

→ pas une machine ditherme !

- Cycle réel :
  - isochores non quasi-statiques, non réversibles (frottements, pertes de chaleur)
  - $\eta_{\text{réel}}$ ~ 20%–25%

- Variante : cycle Diesel
  - carburant injecté à la fin de la compression de l'air
  - auto-allumage suivi d'une combustion isobare (au lieu de isochore)
  - permet un rapport r plus grand, donc un meilleur rendement: $\eta_{\text{réel}}$ ~ 35%–40%

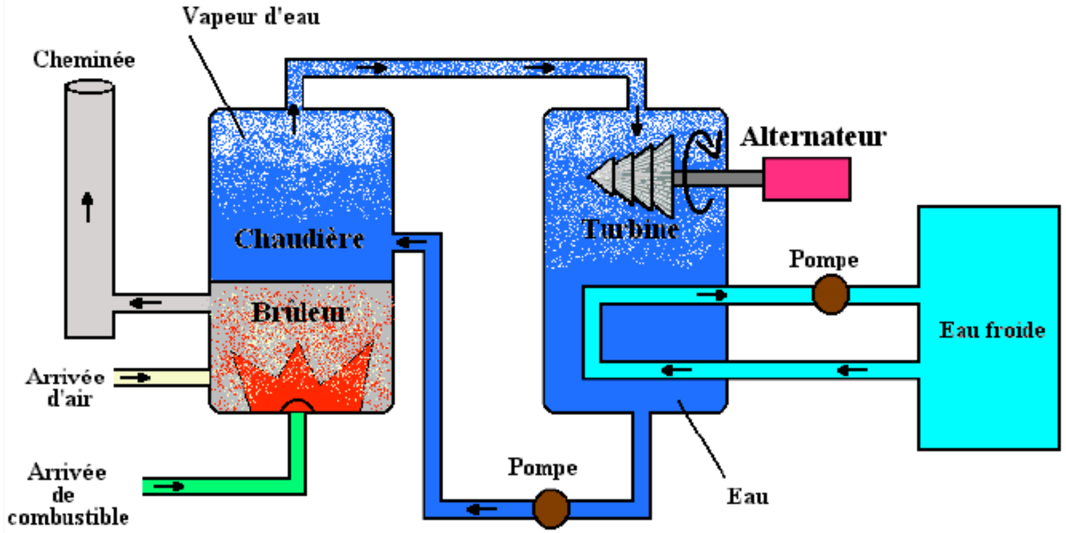
Autres machines thermiques

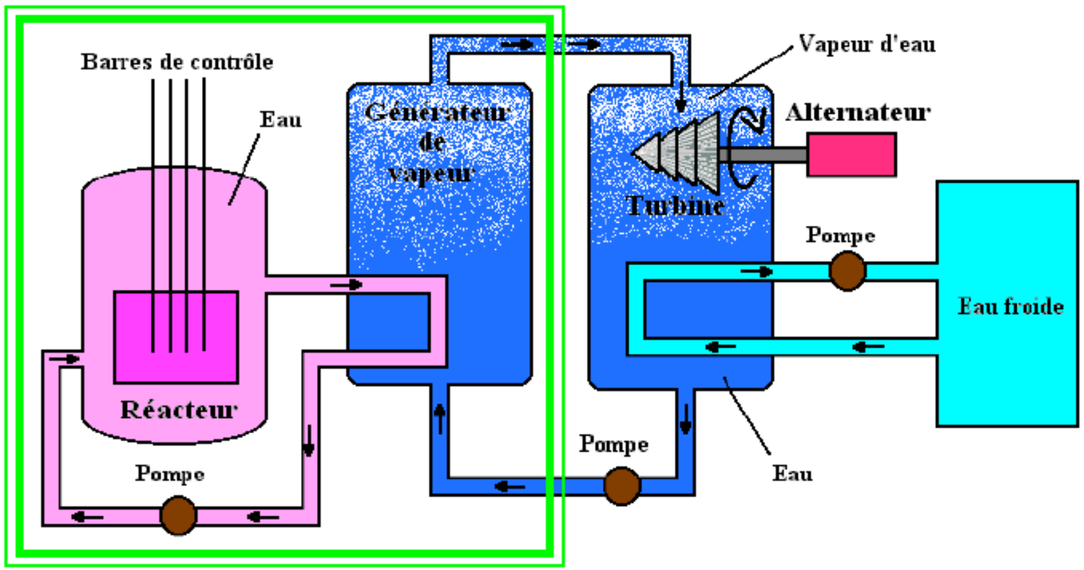
Machines à vapeur:

- Cycles avec transition de phase (eau → vapeur → eau)

- Machines simples
  (avec régulateur de Watt)
  - $\eta_{réel}$ ~ 15%-20%

- Centrales thermiques
  - combustible fossile (charbon, gaz), nucléaire, etc …
  - vapeur surchauffée
    (par ex. 600°C)
    détendue dans une turbine
    (par ex. 180 bars → 50 mbars)
  - refroidissement à eau (fleuve, rivière) ou par évaporation (tour de refroidissement)
  - $\eta_{réel}$ ~ 40%





Autre machines thermiques