

IV Les machines thermiques

Deux catégories de machines thermiques :

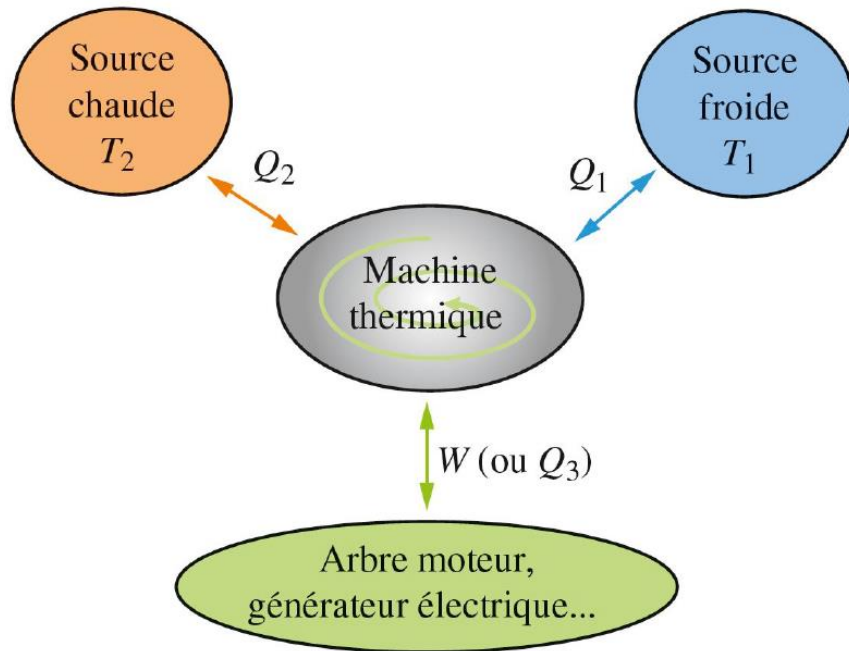
- les moteurs
- les réfrigérateurs / les pompes à chaleur.

Machines thermiques sont constituées de deux sources de chaleur et un échange de travail.

Par convention :

T_1 : température source froide (intérieur réfrigérateur, réserve de la pompe à chaleur, air extérieur pour les moteurs)

T_2 : température source chaude (air extérieur au réfrigérateur, intérieur d'une habitation pour pompe à chaleur, carburant en combustion pour les moteurs)



1. Les moteurs

Production d'un travail mécanique

- Faire avancer un véhicule
- faire tourner un alternateur

Source chaude : la combustion du carburant fournit la quantité de chaleur $Q_2 > 0$

Source froide: le milieu extérieur refroidit la machine qui lui fournit une quantité de chaleur $Q_1 < 0$

Le rendement permet de caractériser l'efficacité de la conversion en énergie mécanique.

Sur un cycle , l'utilisateur a fourni Q_2 et a reçu $-W$.

$$\text{Le rendement } r = \frac{-W}{Q_2} = \frac{|W|}{Q_2}$$

Le rendement est toujours < 1

2. Les réfrigérateurs et climatiseurs

La machine reçoit $W > 0$

Source froide : le milieu à refroidir perd de l'énergie au profit de la machine: $Q_1 > 0$

Source chaude : la machine fournit de la chaleur au milieu extérieur : $Q_2 < 0$

Efficacité de l'extraction ou coefficient de performance (COP) : au cours du cycle, l'utilisateur a fourni un travail W et la quantité de chaleur extraite du milieu à refroidir est Q_1 .

$$\eta = \frac{Q_1}{W}$$

L'efficacité peut être inférieure ou supérieure à 1

3. Les pompes à chaleur

La machine extrait une quantité de chaleur Q_1 de l'air extérieur, sol du jardin ou nappe phréatique et cède une quantité $-Q_2$ au lieu à chauffer .

L'efficacité de chauffage ou coefficient de performance est quantifiée par la quantité de chaleur $-Q_2$ et le travail W fourni à la machine.

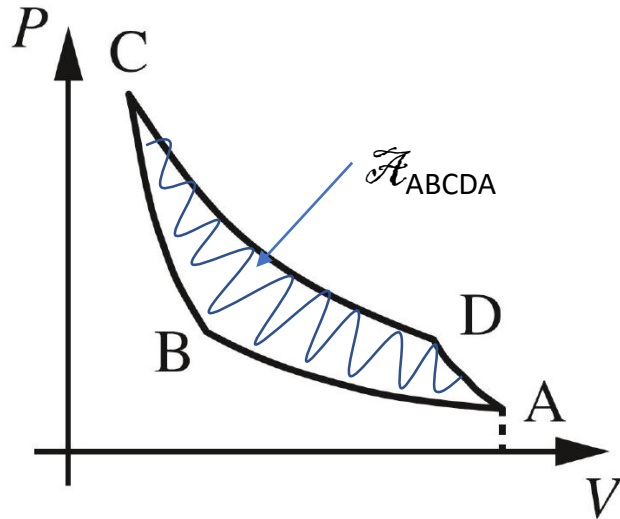
$$\eta = - \frac{Q_2}{W}$$

4. Cycle d'une machine thermique

Système considéré : fluide subissant une transformation cyclique

Moteur thermique : gaz admis enfermé dans un piston à température et pression ambiantes, puis rejeté dans l'atmosphère à T et P ambiantes

Réfrigérateurs : fluide à l'état gazeux à l'entrée du compresseur . Subit une compression, une liquéfaction, une détente, une évaporation. Retour au niveau du compresseur à l'état initial (P et T).



L'aire \mathcal{A}_{ABCD} du cycle est proportionnel au travail produit par le moteur :

$$\mathcal{A}_{ABCD} = -W_{ABCD}$$

$$W_{ABCD} < 0$$

sens de parcours du cycle :

Si sens horaire $\rightarrow W < 0$ cycle moteur

Si sens trigo $\rightarrow W > 0$ cycle résistant

Inégalité de Clausius

- Quantité de chaleur Q_1 échangée avec une source froide à la température T_1
- Quantité de chaleur Q_2 échangée avec la source chaude à la température T_2
- Travail W échangé avec le milieu extérieur d'une manière supposée réversible

Pour un cycle : $\Delta U_{\text{cycle}} = Q_1 + Q_2 + W = 0$ et $\Delta S_{\text{cycle}} = 0$

Sources de chaleur : thermostats de températures constantes T_1 et T_2

Entropie échangée : $S_e = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2}$

Deuxième principe : $\Delta S_{\text{cycle}} = S_e + S_c = 0$ avec $S_c \geq 0$ (entropie créée)

$$\rightarrow \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$$

Pour une transformation réversible : $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$

Rendement maximal d'un moteur ditherme

$$r = \frac{-W}{Q_2}$$

• 1^{er} principe : $\Delta U = W + Q_1 + Q_2$

Pour un cycle : $\Delta U = 0 \rightarrow -W = Q_1 + Q_2$

soit $r = 1 + \frac{Q_1}{Q_2}$

• Inégalité de Clausius : $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0 \rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} \leq -\frac{T_1}{T_2} \rightarrow 1 + \frac{Q_1}{Q_2} \leq 1 - \frac{T_1}{T_2}$

$$r \leq 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Limite maximale pour le rendement d'un moteur ditherme:

rendement de Carnot $r_{carnot} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$

T_2 : température maximale atteinte lors du contact avec la source chaude

T en KELVIN

T_1 : température minimale atteinte lors du contact avec la source froide

Efficacité maximale d'un réfrigérateur et d'une pompe à chaleur

- Réfrigérateur

Efficacité : $\eta = \frac{Q_1}{W}$

1^{er} principe : $\Delta U = W + Q_1 + Q_2 = 0 \rightarrow W = -(Q_1 + Q_2)$

$$\eta = -\frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \leq \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

- Pompe à chaleur

Efficacité : $\eta = -\frac{Q_2}{W}$

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \leq \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Tableau récapitulatif :

Machine Thermique	W	Q ₁	Q ₂	Efficacité	Efficacité de Carnot
Moteur	< 0	< 0	> 0	$r = \frac{-W}{Q_2}$	$r = 1 - \frac{T_1}{T_2}$
Réfrigérateur	> 0	> 0	< 0	$\eta = \frac{Q_1}{W}$	$\eta = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$
Pompe à chaleur	> 0	> 0	< 0	$\eta = -\frac{Q_2}{W}$	$\eta = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$

Q₁ : quantité de chaleur échangée avec la source froide à la température T₁

Q₂ : quantité de chaleur échangée avec la source chaude à la température T₂

Sources de températures variables

T_1 : température source froide ; T_2 température source chaude

$$dU = 0 = \delta W + \delta Q_1 + \delta Q_2 = 0$$

2^{ème} principe : $\frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} \leq 0 = dS$

Relation de Clausius pour l'ensemble du cycle :

$$\int_{T_{1i}}^{T_{1f}} \frac{\delta Q_1}{T_1} + \int_{T_{2i}}^{T_{2f}} \frac{\delta Q_2}{T_2} \leq 0$$

Application : un moteur thermique réversible fonctionnant entre une masse d'eau m initialement à 60°C et l'atmosphère à la température constante de 20°C . Le moteur s'arrête de fonctionner lorsque la température atteint 20°C .

Calculer le transfert thermique reçu par le fluide thermique circulant dans le moteur de la part de l'eau.

Calculer le transfert thermique fourni par ce fluide à l'atmosphère.

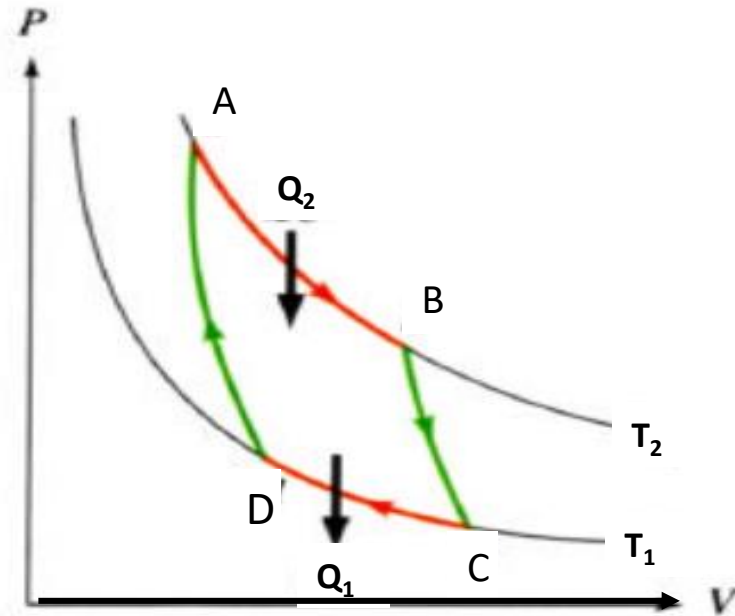
Capacité thermique de l'eau : $C = 4185 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

Le cycle de Carnot

Machine de **référence** purement virtuelle dont le rendement atteint sa valeur maximale soit :

$$r_{carnot} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Constitué de deux transformations **adiabatiques** et deux transformations **isothermes**



Gaz enfermé dans un cylindre

A-B : détente isotherme à la température T_2 – le gaz reçoit une quantité de chaleur Q_2 de la source chaude

B-C : le cylindre est isolé de la source – détente adiabatique

C-D : cylindre en contact avec la source froide – compression isotherme - le gaz cède une quantité de chaleur Q_1

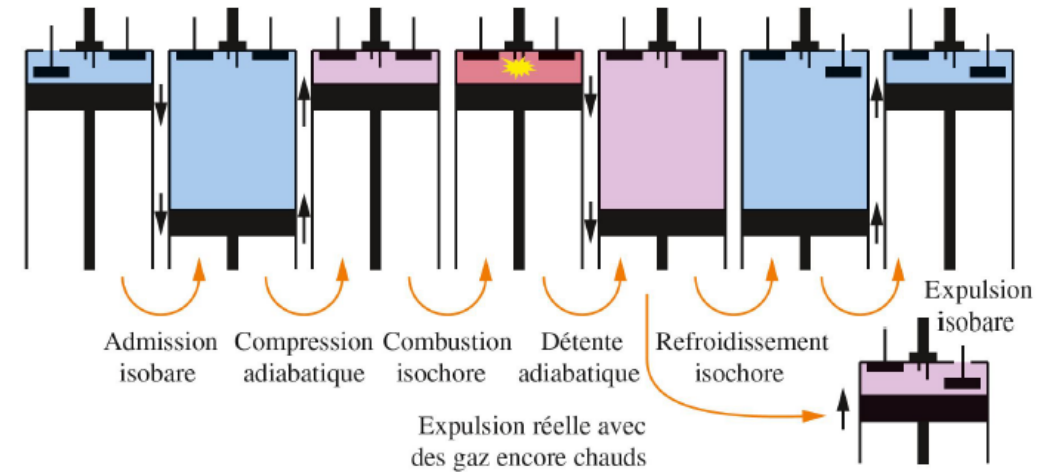
D-A : cylindre isolé thermiquement – compression adiabatique qui ramène le gaz à son état initial A

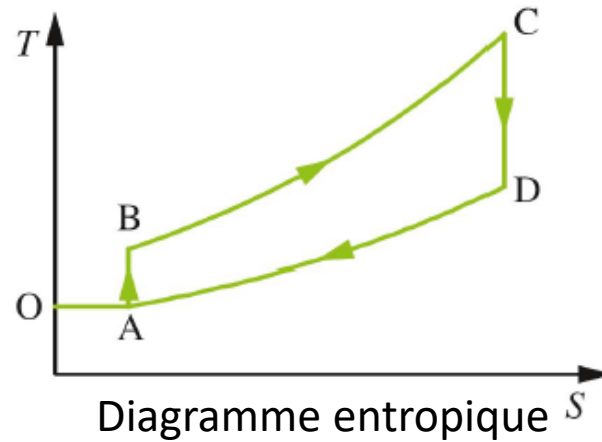
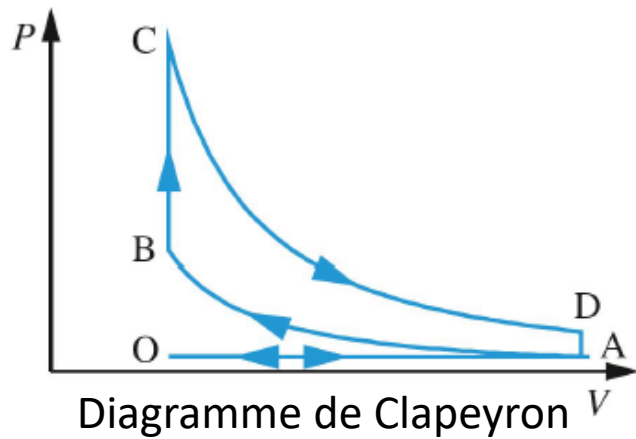
Le gaz reçoit de la chaleur de la source chaude ($Q_2 > 0$), fournit du travail au milieu extérieur ($W < 0$) et de la chaleur à la source froide ($Q_1 < 0$)

5. Moteur à explosion : cycle Beau de Rochas

Moteur quatre temps :

1. Ouverture de la soupape d'admission du cylindre et descente du piston: introduction du mélange air-essence dans le cylindre à pression constante et température extérieure.
2. Fermeture de la soupape d'admission puis remontée du piston : le mélange air-essence est emprisonné dans le cylindre où il est comprimé de manière adiabatique.
3. Etincelle de la bougie qui déclenche la combustion de façon isochore.
4. Descente du piston, le mélange chauffé est toujours dans le piston : détente adiabatique.





OA : admission isobare
 AB: compression adiabatique
 BC: combustion isochore
 CD: détente adiabatique
 DA: refroidissement isochore
 AO : expulsion isobare

Rendement : $r = \frac{-W}{Q_2}$

Comme : $\Delta U = W + Q_2 + Q_1 = 0 \rightarrow r = 1 + \frac{Q_1}{Q_2}$

- $Q_2 = C_v (T_C - T_B) \rightarrow r = 1 + \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B}$
- $Q_1 = C_v (T_A - T_D)$

Les phases AB et CD adiabatiques et supposées réversibles : $T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$ et $T_C V_C^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1}$

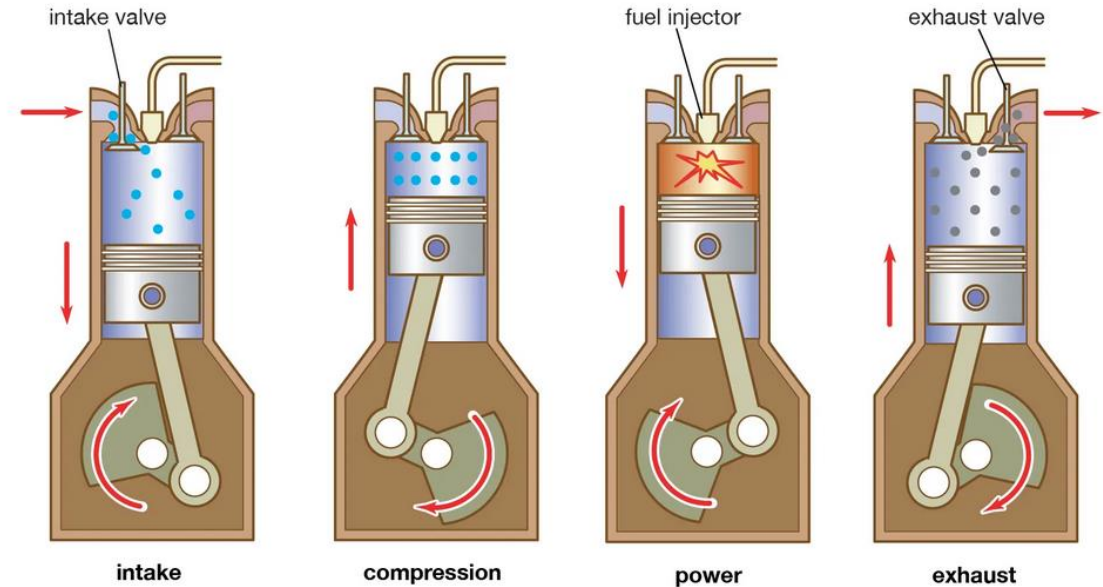
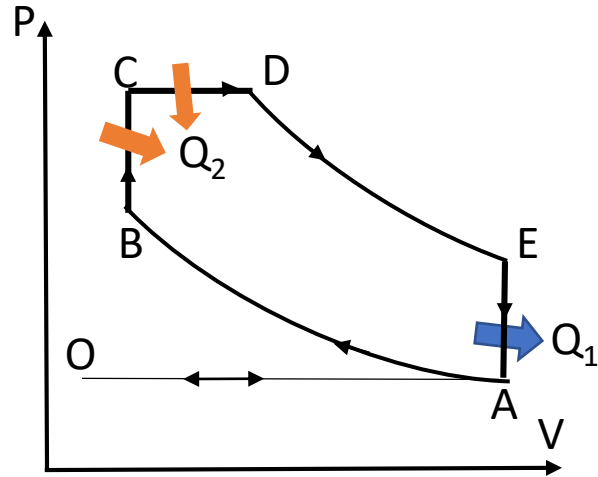
soit : $T_A = \frac{T_B}{\alpha^{\gamma-1}}$ et $T_D = \frac{T_C}{\alpha^{\gamma-1}}$ où $\alpha = \frac{V_A}{V_B} = \frac{V_D}{V_C}$: **taux de compression**

$$r = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}$$

Rendement idéal 60% (pour $\alpha = 10$) - Rendement réel 35%

6. Le cycle Diesel

Moteur à allumage par compression



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Diagramme de Clapeyron- cycle diesel double combustion

OA : admission de l'air

AB : compression adiabatique

En B : injection du carburant

BC : combustion isochore

CD : combustion isobare

DE : détente isentropique

EA : phase d'échappement isochore

AO : échappement des gaz brûlés

Chaleur fournie au gaz :

$$Q_{AB} = 0$$

$$Q_{BC} = C_V (T_C - T_B) > 0$$

$$Q_{CD} = C_P (T_D - T_C) > 0$$

$$Q_{DE} = 0$$

$$Q_{EA} = C_V (T_A - T_E) < 0$$

Rendement : $r = -\frac{W}{Q_2}$

Chaleur reçue : $Q_2 = Q_{BC} + Q_{CD} = C_V(T_C - T_B) + C_P(T_D - T_C)$

$$W + Q_{\text{cycle}} = 0$$

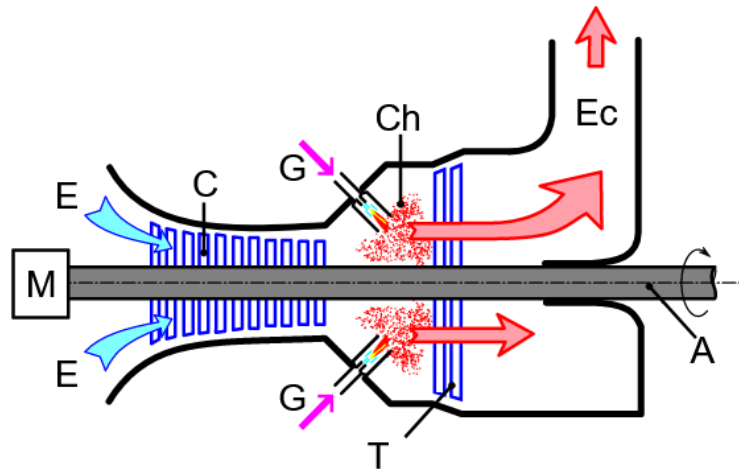
$$-W = Q_{BC} + Q_{CD} + Q_{EA}$$

$$r = \frac{Q_{BC} + Q_{CD} + Q_{EA}}{Q_{BC} + Q_{CD}} = 1 + \frac{Q_{EA}}{Q_{BC} + Q_{CD}} = 1 + \frac{C_V(T_A - T_E)}{C_V(T_C - T_B) + C_P(T_D - T_C)}$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{1} - \frac{T_E - T_A}{(T_C - T_B) + \gamma(T_D - T_C)}$$

7. Cycle de Brayton ou de Joule : turbine à combustion



C : compresseur

E : compression de l'air extérieur

G : injection du combustible (gazeux ou liquide pulvérisé)

Ch : chambre de combustion

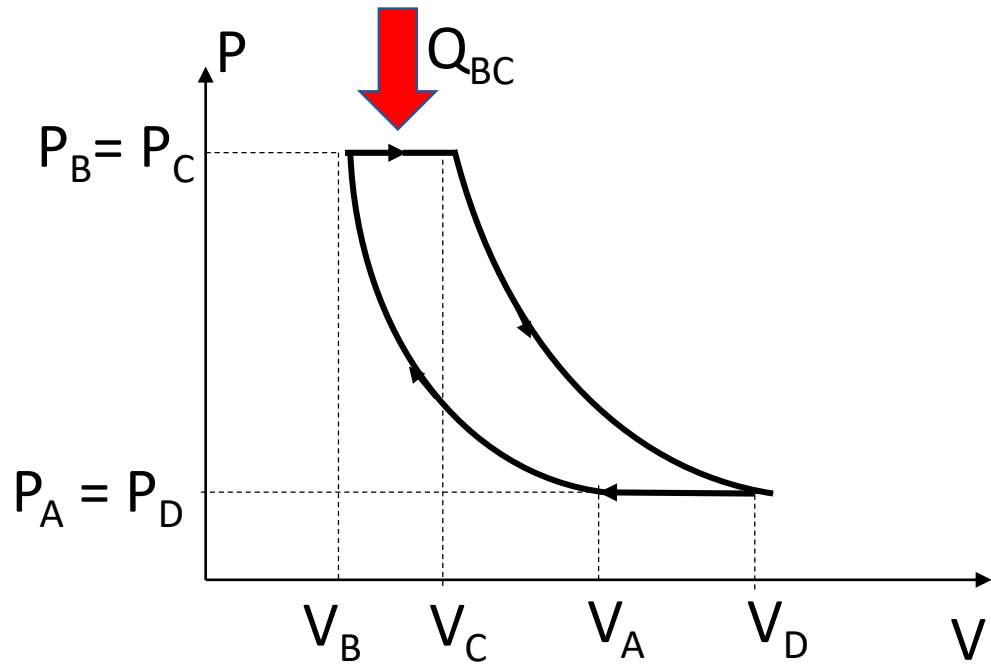
Ec : échappement des gaz par la cheminée

A : arbre en rotation actionnant une machine (pompe, alternateur , hélice)

M: moteur de lancement (démarreur)

Propulsion à grande vitesse (moteurs à réaction)

Puissance mécanique importante pouvant atteindre 60MW



2 adiabatiques (AB et CD)

2 isobares (BC et DA)

$$\text{Rendement : } r = -\frac{W}{Q_{BC}}$$

$$1^{\text{er}} \text{ principe : } \Delta U = W + Q_{BC} + Q_{DA} = 0$$

$$\rightarrow -W = Q_{BC} + Q_{DA}$$

$$r = \frac{Q_{BC} + Q_{DA}}{Q_{BC}} = 1 + \frac{Q_{DA}}{Q_{BC}}$$

$$Q_{BC} = C_p (T_C - T_B) \quad \text{et} \quad Q_{DA} = C_p (T_A - T_D)$$

$$r = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}$$

Application de la loi de Laplace pour la phase AB : $T_A P_A^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)} = T_B P_B^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)}$

Soit $\Gamma = \frac{P_B}{P_A}$ le rapport de pression : $T_A = T_B \left[\frac{P_B}{P_A}\right]^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)} = T_B \Gamma^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)}$

Application de la loi de Laplace pour la phase CD : $T_C P_C^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)} = T_D P_D^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)}$

Soit : $T_D = T_C \left[\frac{P_C}{P_D}\right]^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)} = T_C \left[\frac{P_B}{P_A}\right]^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)} = T_C \Gamma^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)}$

Comme $P_B = P_C$ et $P_A = P_D \rightarrow \Gamma = \frac{P_C}{P_D}$

$$r = 1 + \frac{T_B \Gamma^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)} - T_C \Gamma^{\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)}}{T_C - T_B}$$

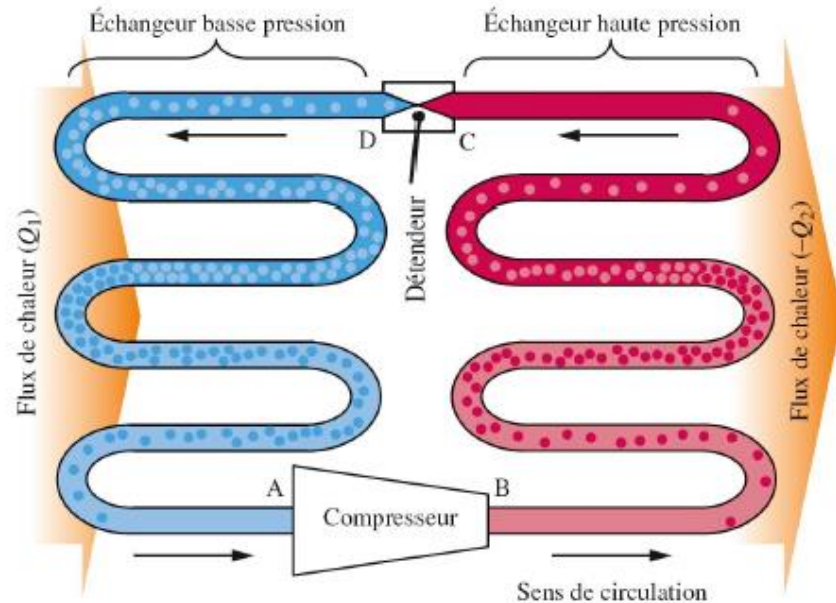
$$r = 1 - \frac{1}{\Gamma^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}}$$

8. Réfrigérateurs et pompes à chaleur

Le cycle de Rankine

Utilisé dans la grande majorité des réfrigérateurs, climatiseurs et pompes à chaleur.

Transitions de phases liquide/gaz



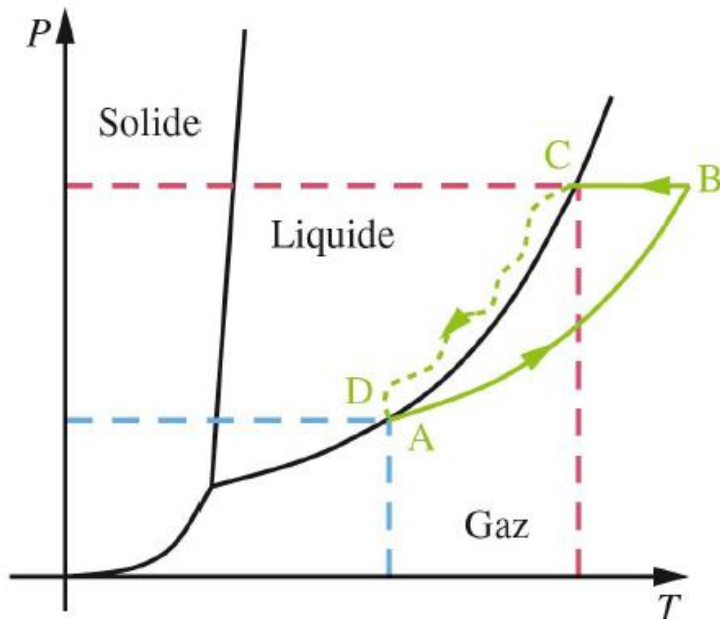
Phase AB : compression adiabatique du gaz froid qui reçoit du travail

→ augmentation de la température du gaz > température de la source chaude

Phase BC : refroidissement du gaz via le contact thermique avec la source chaude → liquéfaction

Phase CD : détente de Joule-Thomson . Chute brutale de pression, une partie du liquide s'évapore et conduit à un équilibre liquide/gaz.

Phase DA : le mélange liquide/gaz parcourt l'échangeur de la source froide (intérieur du réfrigérateur..). La quantité de chaleur reçue par le fluide est absorbée par son évaporation → retour à l'état gazeux .



Cycle de Rankine pour la réfrigération avec diagramme de phase

Grace à la haute pression , il est possible de liquéfier le gaz à haute température. La faible pression suite à la détente de Joule-Thomson conduit à l'évaporation du fluide encore liquide à basse température et permet l'absorption de la quantité de chaleur prise à l'intérieur de l'armoire frigorifique (détente irréversible).

Remarque : il est facile de comprimer un gaz jusqu'à un vingtaine de bars, ce qui devient très compliqué au-delà. Il faut donc trouver un composé dont l'état stable soit à l'état liquide à partir de 10 bars pour une température pouvant aller jusqu'à 40°C.

Compresseur de réfrigérateur

