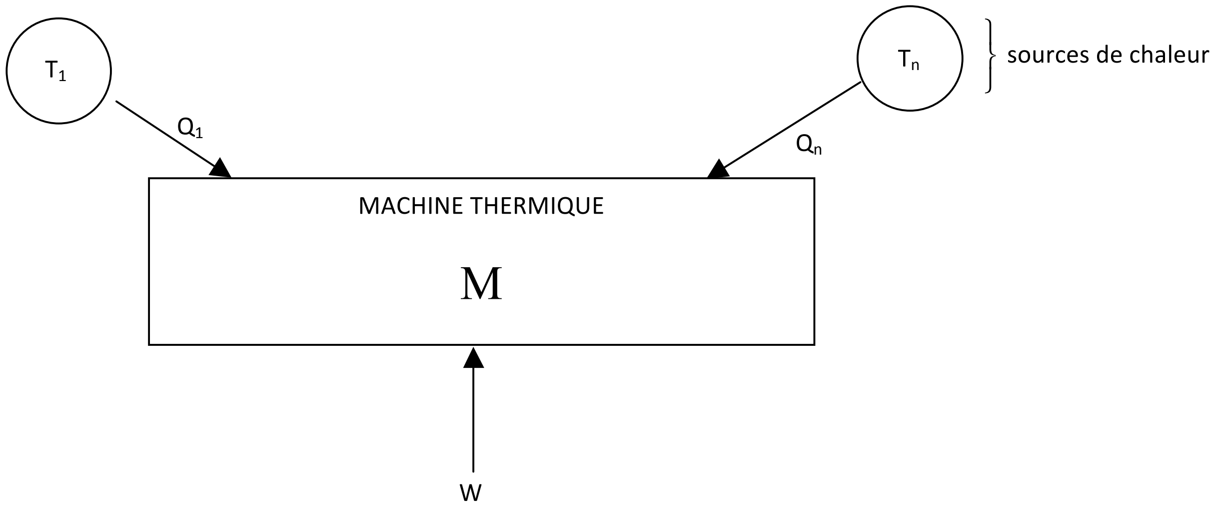
Les Machines thermodynamiques

Table des matières

1) Définition

Une machine thermodynamique est un système fonctionnant grâce à un fluide auquel on fait subir des transformations cycliques au cours desquelles il y a échange d'énergie avec le milieu extérieur.

Le milieu extérieur est constitué de *n* sources de chaleurs (idéalement *n* thermostats) échangeant de la chaleur avec le fluide, et d'un système mécanique échangeant du travail avec le fluide.



si **W > 0**, la machine est un **récepteur**.
si **W < 0**, la machine est un **moteur**.

2) Entropie : second principe de la thermodynamique

Tous les processus macroscopiques réels sont irréversibles ; par conséquent, dans une machine thermodynamique réelle (industrielle), l'ensemble des transformations du cycle décrites par le fluide sont irréversibles.

Cette irréversibilité a des conséquences sur les différents échanges d'énergie, en particulier sur ceux qui seront utiles (récupérables).

Il existe une fonction mathématique, appelée "entropie", qui rend compte de l'irréversibilité des transformations réelles. Nous ne chercherons ni à connaître ses propriétés, ni à en calculer les variations, mais seulement à donner une conséquence essentielle d'une de ses propriétés.

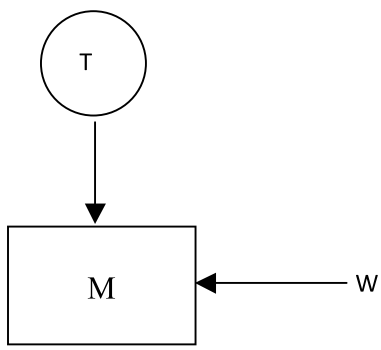
Énoncé : L'entropie S d'un système isolé en évolution est une fonction d'état croissante.
Conséquence : si la transformation est réversible, la variation d'entropie est nulle.
Méthode de calcul de ΔS : S est une fonction d'état, donc, pour calculer sa variation, il suffit de trouver une transformation simple, réversible, ayant les mêmes états initial et final ; alors : $dS = \frac{\delta Q_{rév}}{T} \Rightarrow \Delta S = \int \frac{\delta Q_{rév}}{T}$.

Conséquence : Si Q est le transfert thermique de la transformation réelle, alors : $dS \geq \frac{\delta Q}{T} \Rightarrow \Delta S \geq \int \frac{\delta Q}{T}$.

Cas particulier d'une transformation isotherme : $dS = \frac{\delta Q_{rév}}{T} \Rightarrow \Delta S = \frac{Q_{rév}}{T}$ (car T = cste).

3) Machines monothermes

C'est une machine dont le fluide n'est en contact qu'avec une seule source de chaleur (ou thermostat).



Théorème de Thomson

système : $\left\{ \mathrm{M} \right\}$

1[er] principe : $W + Q = 0$ (car transformation cyclique)

2[ème] principe : $dS \geq \dfrac{\delta Q}{T} \Rightarrow \Delta S \geq \dfrac{Q}{T}$ or la transformation est cyclique, donc $\Delta S = 0$

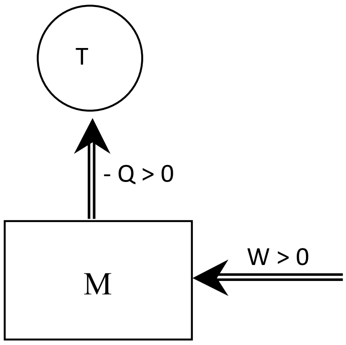
$\Rightarrow Q \leq 0$ (égalité si le cycle est réversible)

synthèse : $\left.\begin{array}{l} W = -Q \\ Q \leq 0 \end{array}\right\} \Rightarrow W \geq 0$

Énoncé du théorème de Thomson (1852) : Les moteurs monothermes n'existent pas.

Il est impossible de créer du travail à partir d'une seule source de chaleur (par exemple, un bateau ne peut avancer uniquement avec le réservoir d'énergie qu'est la mer).

Seule possibilité :

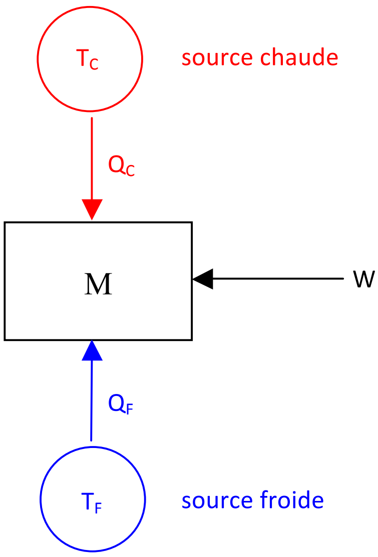


Par exemple : un radiateur électrique

Remarque : si le cycle est réversible, alors $Q = W = 0$, ce qui n'est d'aucune utilité.

4) Machines dithermes

4.1) Schéma de principe



4.2) Inégalité de Clausius

système : $\left\{ \mathrm{M} \right\}$

Application du deuxième principe : $\Delta S \geq \dfrac{Q_C}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F}$ (car S est une grandeur additive ; et le fluide est en contact avec T_C, puis avec T_F au cours d'un cycle).

Or la machine décrit des cycles, donc $\Delta S = 0$; ce qui implique que : $\boxed{\dfrac{Q_C}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F} \leq 0}$. C'est l'inégalité de Clausius.

Remarque : L'inégalité devient égalité si la machine décrit des cycles réversibles.

4.3) <u>Moteur ditherme</u>

4.3.1) Sens des transferts thermiques

- Premier principe : $\Delta U = W + Q_C + Q_F = 0$ (car transformation cyclique)

  $\Rightarrow Q_C + Q_F = - W$

  or $- w > 0 \Rightarrow \boxed{Q_C + Q_F > 0}$

- Raisonnement par l'absurde : si $Q_C < 0$:

  $Q_F > - Q_C > 0$

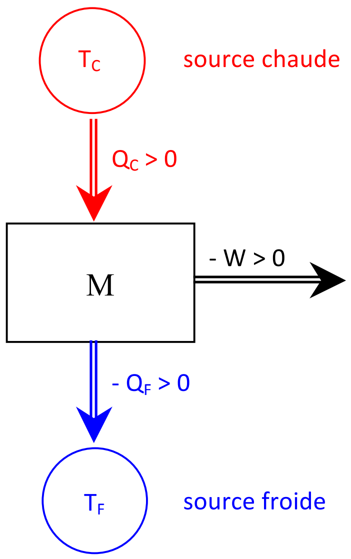
  $\Rightarrow \frac{Q_F}{T_F} > -\frac{Q_C}{T_F} > -\frac{Q_C}{T_C}$

  $\Rightarrow \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} > 0$: ce qui est impossible d'après le second principe (inégalité de Clausius).

Conséquence : $Q_C > 0$ et $Q_F \leq -\frac{T_F}{T_C} Q_C < 0$.

Le moteur ditherme reçoit de la chaleur de la source chaude et en fournit à la source froide.

Le schéma de principe du **moteur ditherme** est donc le suivant :



4.3.2) Rendement : théorème de Carnot

- Définition : rendement = $\left|\frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie dépensée pour le fonctionnement (payée)}}\right|$

  $\boxed{\eta = \frac{-W}{Q_C}}$

- Calcul : $- W = Q_C + Q_F$ (d'après le premier principe)

  d'où : $\eta = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} < 1$, car $\begin{cases} Q_F < 0 \\ Q_C > 0 \end{cases}$

  et $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \Rightarrow \frac{Q_F}{T_F} \leq -\frac{Q_C}{T_C}$

  $\Rightarrow \frac{Q_F}{Q_C} \leq -\frac{T_F}{T_C}$ car $Q_C > 0$

  et donc : $\boxed{\eta \leq 1 - \frac{T_F}{T_C}}$

Il y a égalité si le cycle est réversible : $\eta_{rév} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$

et $\eta \leq \eta_{rév}$

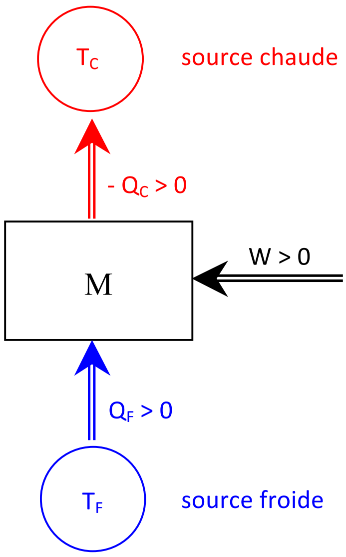
<u>Théorème de Carnot</u> : Tous les moteurs dithermes réversibles ont même rendement qui ne dépend que des températures des sources.
Le rendement des moteurs non réversibles est inférieur à celui des moteurs réversibles.

Énoncé par Carnot en 1824 (ingénieur français). Cet énoncé a constitué le premier énoncé historique du second principe.

Ordre de grandeur : $\left.\begin{array}{l} T_F = 300K \\ T_C = 400K \end{array}\right\}$ donne $\eta \leq 0,25$

4.4) **Récepteurs dithermes**

W > 0. Seul le cas où $Q_C < 0$ présente un intérêt industriel.
Le principe en est d'inverser le sens naturel de transfert de la chaleur en fournissant du travail au récepteur.



4.4.1) Réfrigérateur – Climatiseur

La source froide T_F est le corps à refroidir.

- Définition : l'efficacité est : $e = \left|\dfrac{\text{énergie utile}}{\text{énergie dépensée pour le fonctionnement (payée)}}\right|$

soit : $\boxed{e = \dfrac{Q_F}{W}}$

- Calcul : $W = - Q_F - Q_C$

$$\Rightarrow e = \frac{Q_F}{-Q_F - Q_C} = \frac{-1}{1 + \dfrac{Q_C}{Q_F}}$$

$$\text{or : } \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{Q_C}{T_C} \leq -\frac{Q_F}{T_F}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{Q_C}{Q_F} \leq -\frac{T_C}{T_F} \quad \text{car } Q_F > 0$$

$$\Rightarrow \quad \frac{1}{1 + \dfrac{Q_C}{Q_F}} \geq \frac{1}{1 - \dfrac{T_C}{T_F}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{e \leq \frac{1}{\dfrac{T_C}{T_F} - 1}}$$

On a la même conclusion que pour le théorème de Carnot.

- Ordre de grandeur : $\left.\begin{array}{l} T_F = 260K(= -13°C) \\ T_C = 340K(= 67°C) \end{array}\right\}$ donne $e \leq 3,25$.

4.4.2) Pompe à chaleur

La source chaude T_C est le milieu à chauffer (piscine, habitation, …).

- Définition : l'efficacité est : $e = \left|\dfrac{\text{énergie utile}}{\text{énergie dépensée pour le fonctionnement (payée)}}\right|$

soit : $e = \dfrac{-Q_C}{W}$

- Calcul : $W = - Q_F - Q_C$

$$\Rightarrow \; e = \frac{-Q_C}{-Q_C - Q_F} = \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}}$$

$$\text{or : } \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{Q_F}{T_F} \leq -\frac{Q_C}{T_C}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{Q_F}{Q_C} \geq -\frac{T_F}{T_C} \quad \text{car } Q_C < 0$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{e \leq \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C}}}$$

On a la même conclusion que pour le théorème de Carnot.

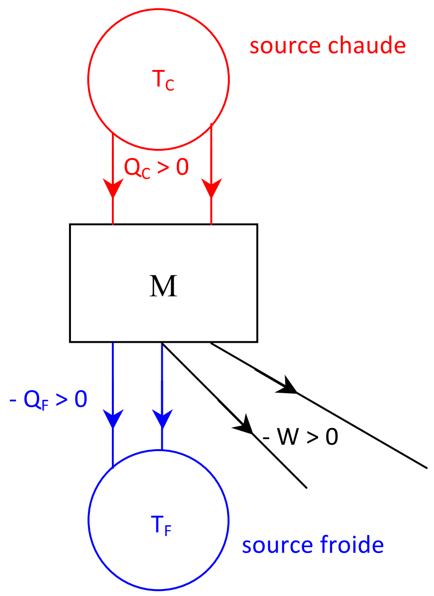
• Ordre de grandeur : $\left. \begin{array}{l} T_F = 263K (= -10°C) \\ T_C = 293K (= 20°C) \end{array} \right\}$ donne $e \leq 9,77$.

Pour un simple radiateur électrique : e = 1. L'apport de chaleur est environ dix fois plus grand ; mais le coût de l'installation est bien plus élevé.

5) Résumé

Moteur ditherme :

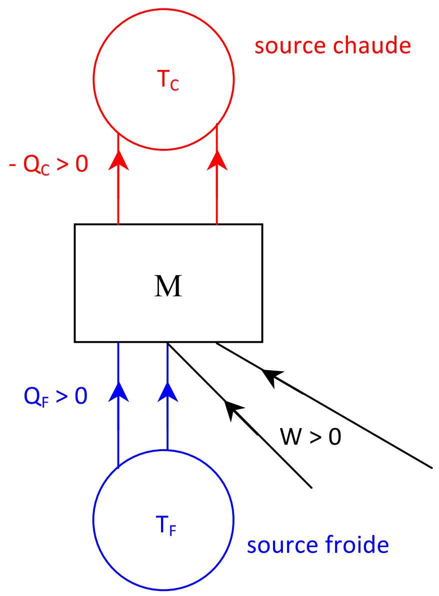
on se sert du transfert naturel de la chaleur pour récupérer un peu de travail



$$\boxed{\eta \leq 1 - \frac{T_F}{T_C} < 1}$$

Récepteur ditherme :

on fournit du travail pour inverser le transfert naturel de la chaleur



La source utile est la source froide : $\boxed{e \leq \frac{1}{\frac{T_C}{T_F} - 1}}$

La source utile est la source chaude : $\boxed{e \leq \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C}} > 1}$