

Machines thermiques

Ce qu'il faut connaître

- Comment s'écrit l'inégalité de Clausius ? Quand y a-t-il égalité ?
- Quel est l'ordre de grandeur du rendement d'un moteur thermique de voiture ?
- Quel est l'ordre de grandeur de l'efficacité d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur ?

Ce qu'il faut savoir faire

- Pour un moteur, une machine réfrigérante ou une pompe à chaleur ditherme, donner le sens des échanges thermiques, la définition du rendement ou de l'efficacité, et savoir exprimer ce dernier / cette dernière en fonction des températures des sources.
- Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine thermique ditherme.

Exercice C1 - Cycle moteur

Soit un cycle ditherme au contact d'une source chaude à T_c et d'une source froide à T_f . Le fluide est un gaz, que l'on modélisera comme parfait, qui suit les étapes idéales suivantes :

- 1 \rightarrow 2 : apport de chaleur au contact de la source chaude, lors de cet apport le gaz évolue de façon isotherme (sa température reste constante égale à T_c). Il reçoit un transfert Q_c .
- 2 \rightarrow 3 : détente adiabatique et réversible.
- 3 \rightarrow 4 : évacuation de chaleur isotherme au contact de la source froide, lors de cet apport le gaz évolue de façon isotherme (sa température reste constante égale à T_f). Il reçoit un transfert Q_f .
- 4 \rightarrow 1 : compression adiabatique et réversible.

1 - Représenter le moteur sur un diagramme où apparaissent moteur, sources, milieu extérieur, Q_c, Q_f et W . Donner les signes de ces grandeurs.

2 - Représenter le tracé du cycle dans le diagramme $p - V$, avec les numéros des étapes. Attention au sens, c'est un moteur donc ?

3 - Définir le rendement du moteur en fonction de grandeurs parmi Q_c, Q_f et W . Attention aux signes.

4 - Écrire le 1^{er} et 2nd principe appliqué au moteur sur un cycle. En déduire une relation entre Q_c, Q_f et W , et une relation entre Q_c/Q_f et T_c/T_f

En déduire l'expression du rendement du moteur. On fera l'application numérique pour $T_f = 20^\circ\text{C}$ et $T_c = 400^\circ\text{C}$.

5 - Comment s'appelle ce cycle ?

6 - Quel est le désavantage des échanges thermiques envisagés ici (température du fluide égale à la température de la source extérieure) ?

I. Généralités

1. Définitions

- Une **machine thermique** est un convertisseur d'énergie faisant intervenir un **fluide caloporteur** (eau, fréons,...) effectuant des **cycles** qui peuvent être réversibles pour une machine idéale (machine de Carnot) ou irréversible pour une machine réelle.

- Deux types de machines
- Moteurs : fournissent du travail ($W < 0$) en recevant de la chaleur ($Q > 0$).
 - Récepteurs : fournissent de la chaleur ($Q < 0$) en recevant du travail ($W > 0$).

2. Bilans énergétiques et entropique d'une machine thermique

Une machine échange du travail W et de la chaleur Q_i avec les sources de température T_i . Le premier principe s'écrit pour un cycle :

$$\Delta U = 0 = W + \sum_i Q_i$$

Le deuxième principe s'écrit pour un cycle :

$$\Delta S = 0 = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} + S_c$$

Puisque $S_c \geq 0$ alors :

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0 \quad \text{inégalité de Clausius}$$

Si l'évolution est réversible, alors :

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

Attention aux inégalités en maths : multiplier une inégalité par un nombre négatif inverse le sens !

II. Machines monothermes

Une machine est dite monotherme si elle n'échange de la chaleur qu'avec une seule source. Exemple : Radiateur électrique.

Impossibilité du moteur monotherme

Un moteur est conçu pour **fournir du travail au milieu extérieur** ($W > 0$). Montrons que cela est impossible lorsque ce moteur est en contact avec une seule source thermique à la température T . Le premier principe s'écrit pour un cycle :

$$\Delta U = 0 = W + Q \Rightarrow W = -Q$$

Le deuxième principe s'écrit pour un cycle $\Delta S = 0 = \frac{Q}{T} + S_c$, puisque : $S_c \geq 0$ et $T > 0$, alors : $Q \leq 0$ et donc $W = -Q \geq 0$

Ce résultat constitue l'énoncé du deuxième principe selon Thomson :

"Une machine thermique ne peut fonctionner de manière motrice en échangeant l'énergie thermique avec une seule source".

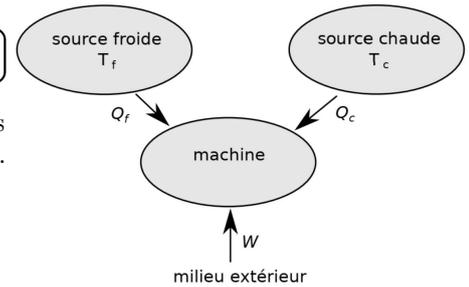
III. Machines dithermes

Tout ce qui suit dans ce III est à **savoir refaire** (pas la peine d'apprendre par coeur...)

Une machine est dite ditherme si elle fonctionne entre deux sources thermodynamiques de température différentes T_c pour la source chaude et T_f pour la source froide, avec $T_c > T_f$.

⇒ Écrire les bilans en énergie et en entropie sur un cycle pour cette machine thermique.

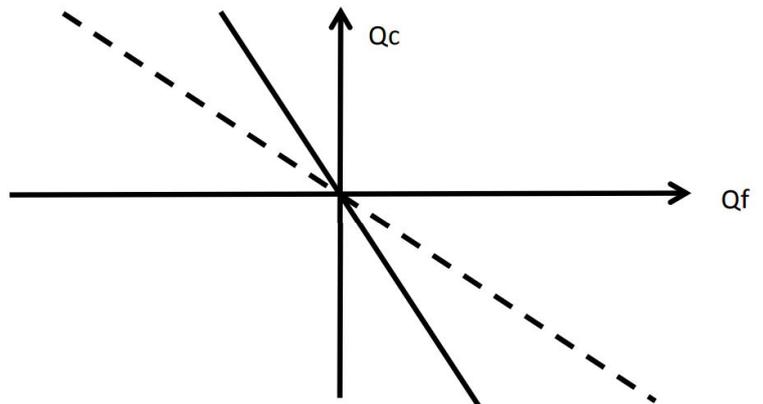
⇒ En déduire Q_c en fonction de W et Q_f , et une inégalité sur Q_c .



1. Les différentes machines possibles : Diagramme de Raveau

On représente les droites d'équation : $Q_c = -Q_f$ et $Q_c = \frac{-T_c}{T_f} Q_f$

- Identifier ces droites en justifiant.
- Hachurer la zone interdite par le second principe.
- Identifier la zone moteur et la zone récepteur, la zone inutile



2. Rendement

On définit $\left\{ \begin{array}{l} \text{le rendement } \rho \\ \text{l'efficacité } e \end{array} \right.$ le rendement ρ /efficacité d'une machine par :

$$\rho \text{ ou } e = \frac{\text{Grandeur utile}}{\text{Grandeur dépensée (payée)}}$$

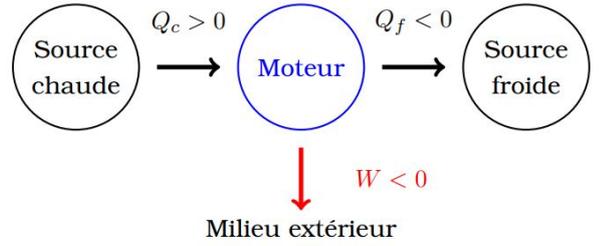
a. moteur ditherme

$$\rho =$$

Le premier principe pendant un cycle donne :

Donc $W =$ et $\rho =$

Si les sources de chaleur sont idéales ($T = cste$), l'inégalité de Clausius implique :



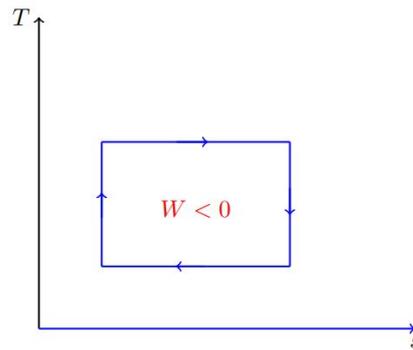
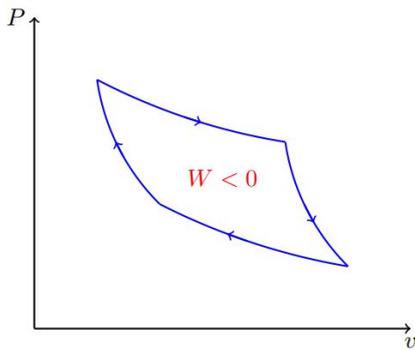
Théorème de Carnot

Tous les moteurs dithermes réversibles fonctionnant entre deux mêmes sources ont le même rendement :

$$\rho_{\max} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot est formé de deux isothermes reliés par deux adiabatiques réversibles (isentropiques) (figure 2a et 2 b). Rappelons que la pente d'une isentropique est plus forte que celle d'une isotherme. Diagrammes de Clapeyron et entropique :



b. Réfrigérateur

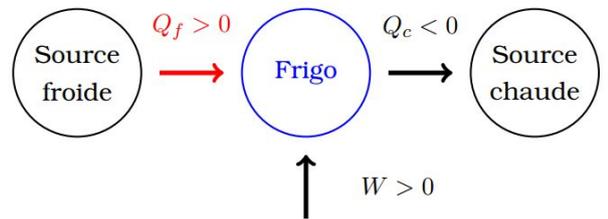
$$e_F =$$

Puisque $W = -Q_c - Q_f$, alors $e_F = -\frac{1}{1 + \frac{Q_c}{Q_f}}$

Or : $\frac{Q_c}{Q_f} \leq -\frac{T_c}{T_f}$, donc :

$$e_F \leq e_{F \max} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Remarque : e_F peut être supérieur à 1 .

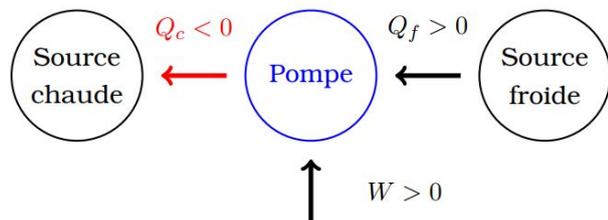


c. Pompe à chaleur

$$e_T = \frac{Q_c}{Q_c + Q_f} = \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}}$$

Puisque : $\frac{Q_f}{Q_c} \leq -\frac{T_f}{T_c}$

$$e_T \leq e_{T \max} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$



IV. Tableau récapitulatif

(Il faut connaître les trois premières lignes, puis savoir redémontrer l'expression des rendements ou efficacités dans chacun des cas ; pour les ordres de grandeur retenir que $\eta \simeq 0,3$ et $e \simeq 3$.)

	Moteur	Réfrigérateur	Pompe à chaleur
Grandeur utile	$-W$	Q_f	$-Q_c$
Grandeur coûteuse	Q_c	W	W
Rendement ou efficacité	$\eta = \frac{-W}{Q_c}$	$e = \frac{Q_f}{W}$	$e = \frac{-Q_c}{W}$
Expression dans le cas réversible car 2 nd ppe $\Rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} = -\frac{T_f}{T_c}$	soit $\eta = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c}$ $\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c} \leq 1$	soit $e = \frac{Q_f}{-Q_c - Q_f}$ $e = \frac{T_f}{T_c - T_f} \in [0, +\infty[$	soit $e = \frac{Q_c}{Q_c + Q_f}$ $e = \frac{T_c}{T_c - T_f} > 1$
Ordres de grandeur réels	Moteur de voiture : $\eta = \frac{-W_{\text{arbre moteur}}}{Q_c} \sim 0,3$ Puissance : $P \sim 100$ kW	Réfrigérateur domestique : $e \sim 3$ $P_{\text{elec}} \sim 200$ W, donc $\dot{Q}_f = e \times P_{\text{elec}} \sim 300$ W	Pompe à chaleur domestique : $e = \frac{-Q_c}{W_{\text{elec}}} \sim 3$

Remarque : La cogénération

Dans le rendement d'un moteur, on ne tient pas compte de la chaleur fournie à la source froide car il s'agit d'un terme de perte qui ne nous intéresse pas. Cette définition est historique et date de la naissance de la thermodynamique. Aujourd'hui, la chaleur perdue est considérée comme une perte à éviter.

Par exemple, on utilise aujourd'hui la cogénération qui consiste à produire en même temps et dans la même installation de l'énergie thermique et de l'énergie mécanique. La chaleur est utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude à l'aide d'un échangeur. L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique grâce à un alternateur.

La cogénération a pour objectif de limiter les déperditions énergétiques, et donc d'utiliser l'énergie perdue (la chaleur de combustion). En plus d'être écologique, ce procédé a l'avantage d'offrir un excellent rendement global, qui est de l'ordre de 80 à 90%.