

TH4 : Machines thermiques

Table des matières

1	Description des machines thermiques cycliques	1
2	Machines dithermes	2
2.1	Moteur ditherme	2
2.2	Machine frigorifique ditherme	3
2.3	Pompe à chaleur ditherme	5
2.4	Cycle de Carnot	6

1 Description des machines thermiques cycliques

L'intérêt d'une machine thermique est qu'elle permet une **conversion d'énergie**. Pour permettre un fonctionnement en continu en régime permanent, une machine thermique **effectue des cycles**. Pour la plupart des machines, un fluide (eau, air, fréon...) circule entre les différents organes. Les transformations que subit le fluide permettent les échanges énergétiques entre la machine et le milieu extérieur.

Définition d'un moteur ou d'un récepteur

La machine thermique est un **moteur** si elle **fournit du travail**. Cela revient à dire que le travail total échangé par la machine avec le milieu extérieur au cours d'un cycle est négatif.

Par opposition, un **récepteur** est une machine qui **reçoit du travail**. Les récepteurs usuels sont les machines frigorifiques et les pompes à chaleur.

Considérons une machine thermique en contact avec une source de travail et des sources de chaleurs. **Au cours d'un cycle de fonctionnement**, le fluide de cette machine échange :

- Un travail W avec le milieu extérieur
- Une quantité de chaleur Q_i avec les différentes sources i de température T_i .

Pour un cycle complet de la machine, comme U est une fonction d'état on a $\Delta U = 0$, l'application du **premier principe** nous donne donc :

$$W + \sum_i Q_i = 0$$

Appliquons le **deuxième principe** au fluide de la machine thermique au cours d'un cycle :

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

Or $\Delta S = 0$ puisque le fonctionnement de la machine est cyclique et l'entropie créée vérifie $S_c \geq 0$. On en déduit l'inégalité de clausius :

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = -S_c \leq 0$$

L'égalité concerne le cas de la machine réversible pour laquelle $S_c = 0$.

2 Machines dithermes

Définition d'une machine ditherme

Une machine ditherme échange de la chaleur avec deux sources de chaleur de températures respectives T_c et T_f . Nous désignerons ces deux sources par source chaude (T_c) et source froide (T_f) avec $T_c > T_f$. La plupart des machines usuelles sont dithermes.

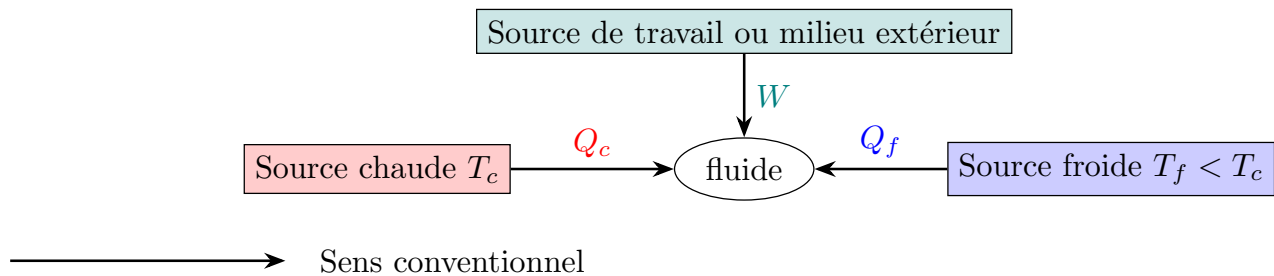


Figure 1 – Schéma de principe des échanges

Le premier principe s'écrit :

$$W = -Q_c - Q_f$$

Le second principe s'écrit :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$$

2.1 Moteur ditherme

Définition d'un moteur ditherme

Un moteur ditherme ($W < 0$) reçoit un transfert thermique de la source chaude ($Q_c > 0$) et cède un transfert thermique à la source froide ($Q_f < 0$).

Le rendement ρ du moteur est le rapport entre le travail fourni par le moteur (utile) et la chaleur reçue de la source chaude (coûteux). La chaleur cédée à la source froide est considérée comme un effet secondaire sans utilité et sans coût.

$$\rho = \frac{\text{travail fourni}}{\text{chaleur reçue de la source chaude}}$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{|W|}{Q_c} = -\frac{W}{Q_c} \geq 0$$

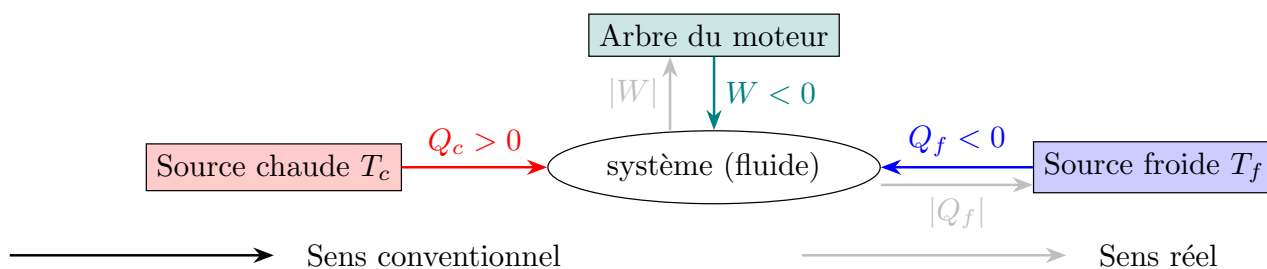


Figure 2 – Schéma de principe des échanges pour un moteur ditherme

Le rendement s'écrit donc :

$$\rho = \frac{|W|}{Q_c} = -\frac{W}{Q_c} = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$$

D'après le bilan entropique :

$$\frac{Q_f}{T_f} \leq -\frac{Q_c}{T_c} \quad Q_{\varepsilon} \geq 0 \quad \frac{Q_f}{Q_c} \leq -\frac{T_f}{T_c}$$

$$\Rightarrow \underbrace{1 + \frac{Q_f}{Q_c}}_{\rho} \leq \underbrace{1 - \frac{T_f}{T_c}}_{\rho_{max}}$$

Rendement maximal théorique d'un moteur ditherme

Le rendement ρ du moteur ditherme est inférieur à une limite ρ_{max} fonction de la température des sources :

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

Le rendement maximal serait obtenu pour le cas limite du moteur réversible. Il s'agit d'une limite théorique imposée par les deux principes de la thermodynamique. Les diverses causes d'irréversibilité font que le rendement effectif d'un moteur lui est toujours inférieur. On remarque que la source froide étant donnée, le rendement maximal théorique est une fonction croissante de la température de la source chaude.

2.2 Machine frigorifique ditherme

Définition d'une machine frigorifique ditherme

Une machine frigorifique est un récepteur ($W > 0$) qui reçoit de la chaleur de la source froide ($Q_f > 0$) dans le but de la refroidir.

On a donc $Q_c = -W - Q_f < 0$: la machine frigorifique cède de la chaleur à la source chaude.

Son **efficacité frigorifique** e_F est le rapport entre l'énergie utile et l'énergie dépensée :

$$e_F = \frac{Q_f}{W}$$

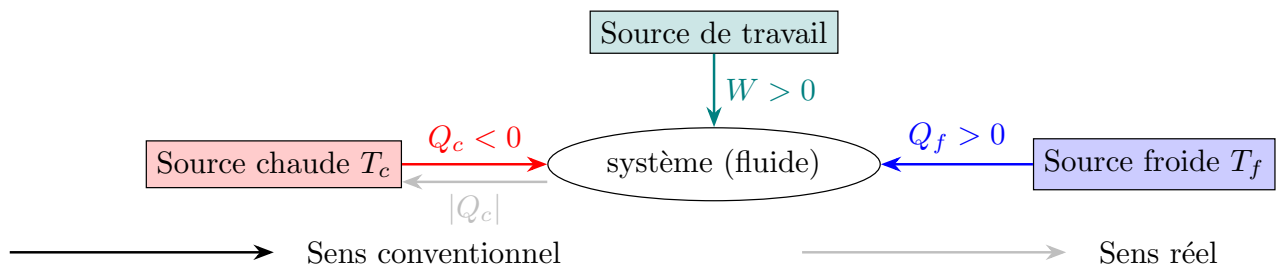


Figure 3 – Schéma de principe des échanges d'une machine frigorifique

La chaleur Q_c n'étant ni utile ni dépensée, elle ne figure pas dans le bilan :

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

D'après le bilan entropique :

$$\frac{Q_c}{T_c} \leq -\frac{Q_f}{T_f} \quad \Leftrightarrow \quad -\frac{Q_c}{Q_f} \geq \frac{T_c}{T_f}$$

$$\Rightarrow -1 - \frac{Q_c}{Q_f} \geq -1 + \frac{T_c}{T_f} \Leftrightarrow \frac{1}{-1 - \frac{Q_c}{Q_f}} \leq \frac{1}{-1 + \frac{T_c}{T_f}}$$

$$\Rightarrow e_F \leq \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Efficacité frigorifique maximale

L'efficacité frigorifique d'une machine frigorifique ditherme est limitée par une valeur maximale théorique e_{Fmax} qui dépend de la température des sources :

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

L'efficacité maximale théorique est atteinte dans le cas limite de la machine réversible. On remarque que la source chaude T_c étant donnée (milieu extérieur pour la plupart des cas), l'efficacité maximale théorique est une fonction croissante de la température de la source froide T_f . Elle tend vers 0 lorsque T_f tend vers 0. Les deux principes de la thermodynamique interdisent donc d'accéder à la température 0, on ne peut que s'en approcher de plus en plus. **Contrairement au rendement d'un moteur, l'efficacité frigorifique peut être supérieure à 1.**

2.3 Pompe à chaleur ditherme

Définition d'une pompe à chaleur ditherme

Une pompe à chaleur est un récepteur ($W > 0$) destiné à fournir de la chaleur à la source chaude ($Q_c < 0$). Le signe des échanges est le même que pour machine frigorifique ($Q_f > 0$) mais cette fois-ci l'énergie utile est $|Q_c|$, la chaleur reçue par la source chaude. Son **efficacité thermique** e_T est égale au rapport entre l'énergie utile et l'énergie dépensée :

$$e_T = \frac{|Q_c|}{W}$$

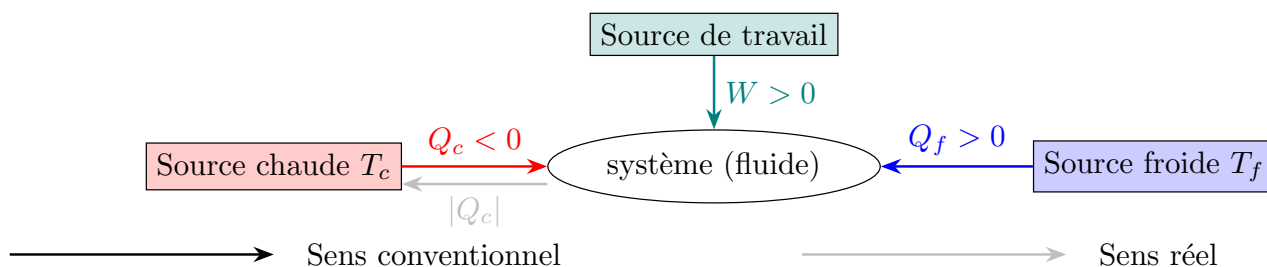


Figure 4 – Schéma de principe des échanges d'une pompe à chaleur

Le premier principe nous donne :

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

D'après le bilan entropique :

$$\frac{Q_f}{T_f} \leq -\frac{Q_c}{T_c} \quad Q_{\text{é}} \leq 0 \quad \frac{Q_f}{Q_c} \geq -\frac{T_f}{T_c}$$

$$\Rightarrow 1 + \frac{Q_f}{Q_c} \geq 1 - \frac{T_f}{T_c} \Leftrightarrow \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}} \leq \frac{1}{1 - \frac{T_f}{T_c}}$$

$$\Rightarrow e_T \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

Efficacité thermique maximale

L'efficacité thermique d'une machine pompe à chaleur ditherme est limitée par une valeur maximale théorique e_{Tmax} qui dépend de la température des sources :

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

L'efficacité thermique est maximale pour le cas limite de la machine réversible. On remarque que la source froide T_f étant donnée (milieu extérieur pour la plupart des cas), l'efficacité thermique maximale théorique est une fonction décroissante de la température de la source chaude T_c . **Contrairement au rendement d'un moteur, l'efficacité thermique peut être supérieure à 1.**

2.4 Cycle de Carnot

Un cycle ditherme réversible est appelé cycle de Carnot. Une différence de température entre le système et la source implique l'irréversibilité des échanges thermiques. Au contact des sources, le système est donc en évolution isotherme. Lorsqu'il n'est pas en contact avec les sources, le système est en évolution adiabatique réversible, c'est-à-dire isentropique.

Cycle de Carnot

Un cycle ditherme réversible, ou cycle de Carnot, est constitué de deux isothermes reliées par deux isentropiques.

On a représenté ci-dessous le cycle de Carnot moteur décrit par un gaz parfait en diagramme de Watt (P, V) et entropique (T, S).

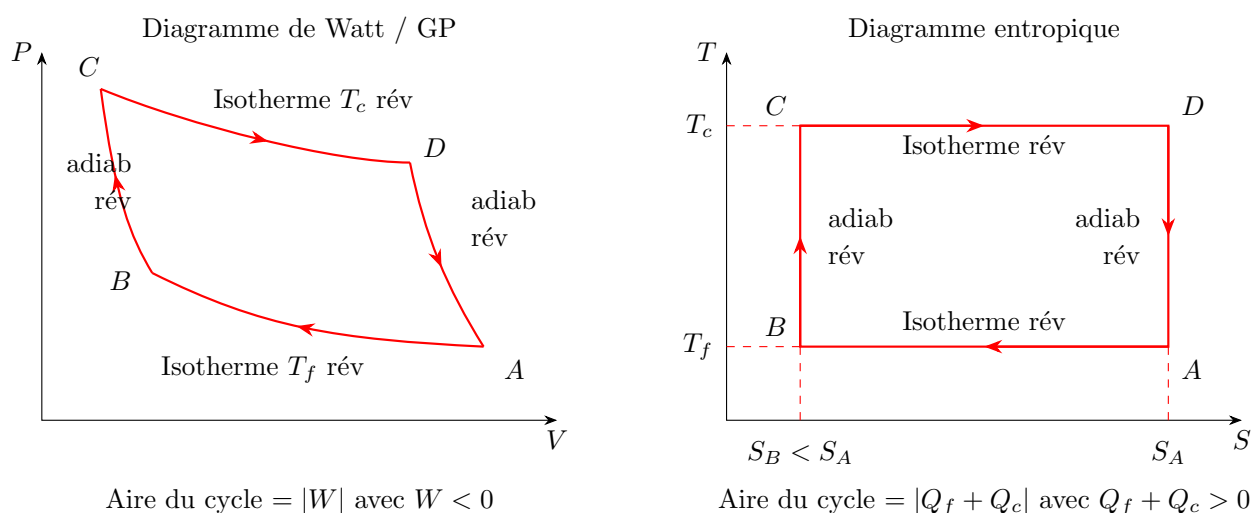


Figure 5 – Cycle de Carnot

Bien que de tels cycles atteignent les limites de performances théoriques, les machines correspondantes sont difficiles à mettre en œuvre techniquement, c'est pourquoi **les machines usuelles fonctionnent suivant des cycles différents.**