



Machines thermiques

I. Description des machines thermiques

1. Généralités

On appelle **machine thermique** tout dispositif capable de convertir, de façon continue, de l'énergie thermique en énergie mécanique et inversement, lors d'une transformation cyclique.

Au cours du cycle, l'agent thermique (fluide caloporteur) échange de l'énergie par travail et par chaleur.

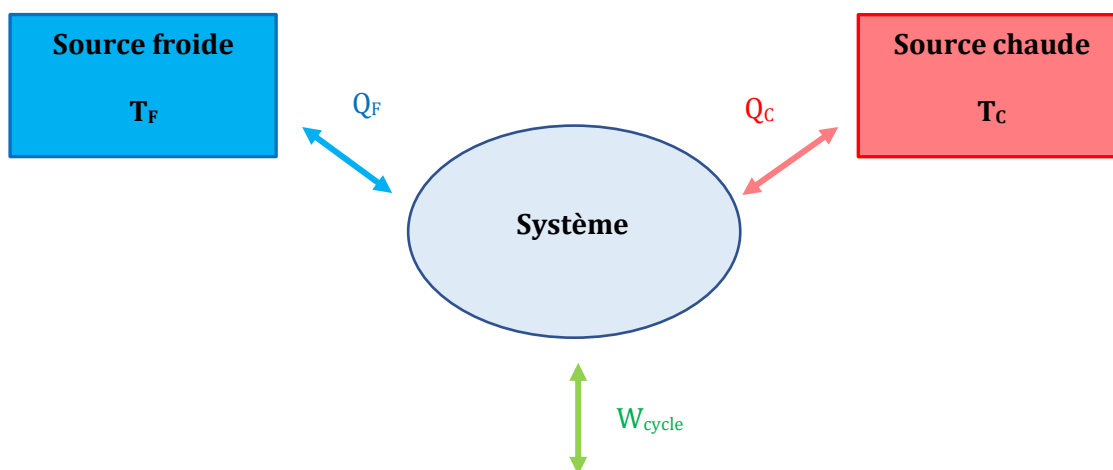
Les transferts thermiques se font au contact de **sources thermiques**.

Nous allons restreindre notre étude aux cas particulier mais fondamental des **machines thermiques dithermes**, qui au cours d'un cycle vont être **en contact successivement avec deux thermostats** :

- Une source chaude de température T_C
- Une source froide de température $T_F < T_C$

Le transfert thermique total au cours du cycle est $Q_{\text{cycle}} = Q_C + Q_F$ où Q_C et Q_F sont les transferts thermiques au contact respectivement de la source chaude et de la source froide.

Le travail total algébriquement reçu au cours du cycle est W_{cycle} .



Le signe des échanges énergétiques dépend de la nature de la machine.

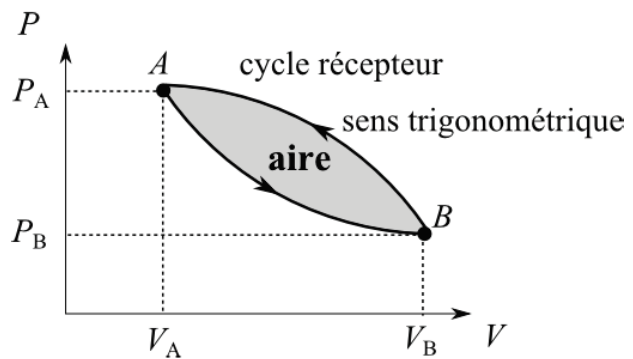
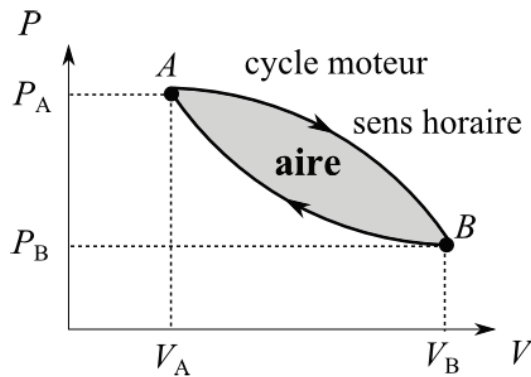
2. Types de machine

Une machine thermique qui fournit globalement du travail au milieu extérieur est une **machine motrice** ou moteur : $W_{\text{cycle}} < 0$. Dans $P(V)$, un tel cycle est décrit dans le sens **horaire**.

Exemples : moteurs de voiture, centrale nucléaire

Une machine thermique qui reçoit globalement du travail de la part du milieu extérieur est une **machine réceptrice** : $W_{\text{cycle}} > 0$. Dans $P(V)$, un tel cycle est décrit dans le sens **anti horaire**.

Exemples : pompe à chaleur (PAC), réfrigérateur



3. Bilans et inégalité de Clausius

Lors d'un cycle : $\Delta E_{\text{cycle}} = 0$ et $\Delta S_{\text{cycle}} = 0$ puisque le système revient à son état initial.

1^{er} principe $\Rightarrow \Delta E_{\text{cycle}} = W_{\text{cycle}} + Q_{\text{cycle}} = 0$

Dans le cas d'une machine ditherme : $W_{\text{cycle}} + Q_C + Q_F = 0$



2^{ème} principe $\Rightarrow \Delta S = S^e + S^c = 0$ avec $S^c \geq 0 \Rightarrow S^e \leq 0$

Dans le cas d'une machine ditherme : $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} + S^c = 0$

$S^c \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \quad \text{INEGALITE DE CLAUDIUS}$

L'inégalité de Clausius est une reformulation du second principe en termes de transferts thermiques.

Cas particulier d'un cycle réversible : $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0$



Montrer qu'une machine **monotherme** est forcément réceptrice.

Une machine monotherme est toujours réceptrice. Pour réaliser un moteur, il faut envisager des échanges thermiques avec au moins deux sources thermiques !

4. Cycle de Carnot

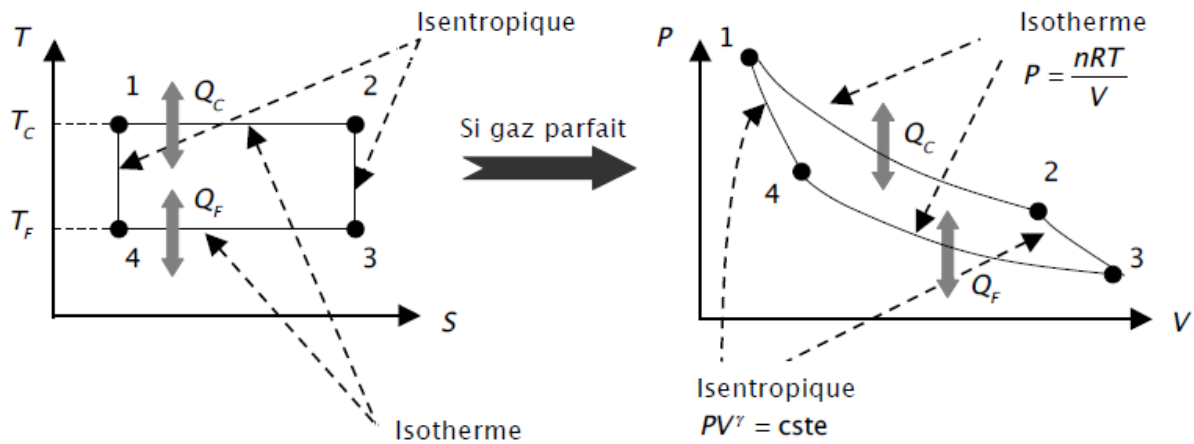
Le cycle d'une machine ditherme totalement réversible et fonctionnant entre deux thermostats, de températures T_C et T_F est appelé **cycle de Carnot**. Il est analogue pour tous les types de machines, seuls changent les signes des échanges d'énergie selon que la machine est réceptrice ou motrice.

Une telle machine est appelée **machine de Carnot**.

Les étapes au contact des sources sont **monothermes** mais également **réversibles** par hypothèse : ce sont donc des **isothermes** à la température des sources.

Les étapes intermédiaires sont nécessairement des **adiabatiques** lors desquelles un travail permet de modifier la température sans transfert thermique, et comme elles sont **réversibles** par hypothèse, ce sont des **isentropiques**.

**Le cycle de Carnot correspond à quatre transformations réversibles :
2 isothermes et 2 isentropiques.**



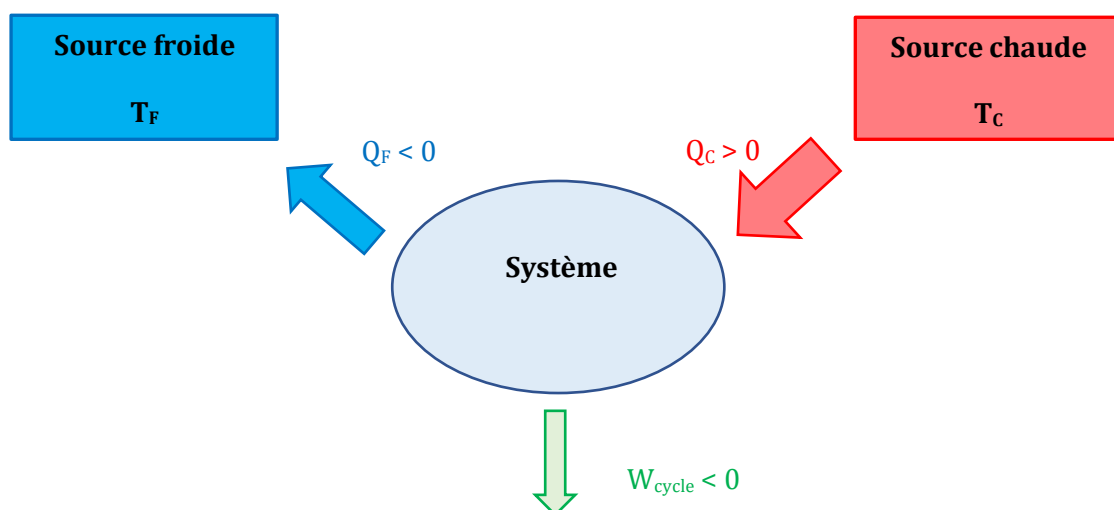
5. Efficacité d'une machine thermique

De manière générale, on définit l'efficacité d'une machine thermique par la relation suivante :

$$e = \frac{\text{transfert d'énergie utile}}{\text{transfert d'énergie coûteux}}$$

II. Machines dithermes motrices

1. Fonctionnement général d'un moteur ditherme



Le système reçoit de l'énergie de la part de la source chaude, en convertit une partie en travail et rejette le reste à la source froide : $Q_C = |W_{cycle}| + |Q_F|$

2. Efficacité ou rendement d'un moteur ditherme

Pour une machine motrice, le transfert énergétique utile (« qui nous intéresse ») est le travail fourni.

Dans le cas d'un moteur ditherme mettant en jeu deux transferts thermiques se faisant au contact de deux thermostats, le transfert énergétique coûteux est le transfert thermique au contact de la source chaude Q_C .

$Q_C > |W_{cycle}|$ donc l'efficacité d'une machine motrice est inférieure à 1 et est aussi appelée rendement, noté η .



À partir du 1^{er} principe appliqué au cycle, exprimer η en fonction des transferts thermiques.

$$\text{Efficacité d'un moteur ditherme : } \eta = \frac{-W_{cycle}}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

L'efficacité est comptée positivement, Q_C est positive mais W_{cycle} est négatif, d'où le signe - dans la formule.

3. Machine motrice de Carnot : Théorème de Carnot



À partir du 2nd principe appliqué au cycle réversible, exprimer l'efficacité de Carnot η_{Carnot} en fonction des températures. En déduire une inéquation dans le cas non réversible.

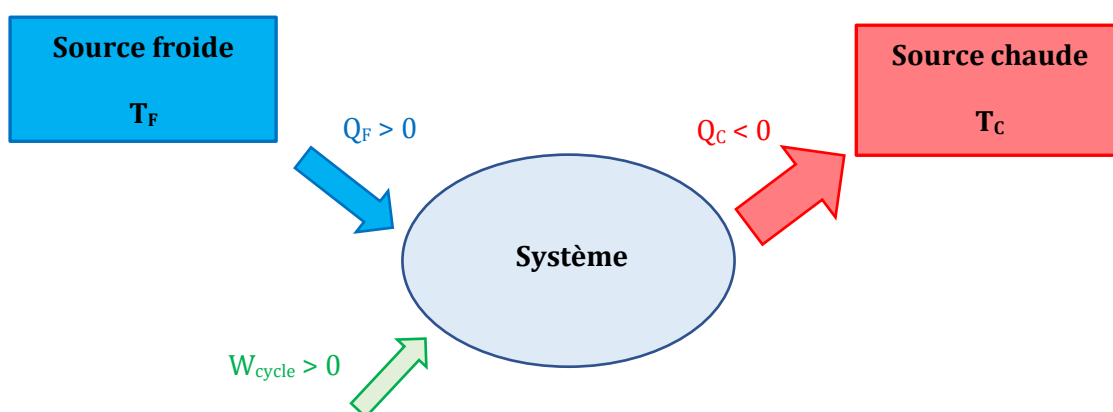
Théorème de Carnot

L'efficacité d'un moteur ditherme réversible ne dépend que des températures des sources et a pour expression $\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$.

L'efficacité d'un moteur réel est inférieure à l'efficacité d'un moteur réversible fonctionnant entre les 2 mêmes sources : $\eta \leq 1 - \frac{T_F}{T_C}$.

III. Machines dithermes réceptrices

1. Fonctionnement général



Le système réalise un transfert thermique non spontané : grâce au travail reçu, il transfère de l'énergie de la source froide vers la source chaude : $W_{cycle} + Q_F = |Q_C|$

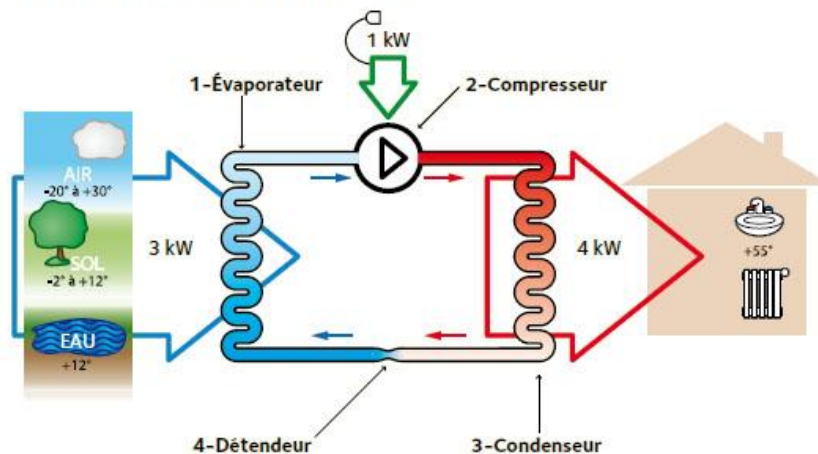
Ces machines utilisent le fait que les liquides absorbent de l'énergie pour se vaporiser et que les gaz en libèrent lorsqu'ils se liquéfient.

Pour une machine réceptrice, le transfert énergétique coûteux est le travail reçu. Pour exprimer l'efficacité, il faut distinguer PAC et réfrigérateur car l'énergie utile (intéressante) n'est pas la même.

2. Principe d'une PAC

On désire chauffer un appartement à l'aide d'une PAC. Pour cela, on devra installer le condenseur à l'intérieur de l'appartement jouant le rôle de source chaude alors que l'évaporateur sera placé à l'extérieur au contact d'une source froide.

PRINCIPE D'UNE POMPE À CHALEUR



Dans le cas d'une PAC mettant en jeu deux transferts thermiques se faisant au contact de 2 thermostats, **le transfert énergétique utile est le transfert thermique fourni à la source chaude Q_C .**

L'efficacité d'une pompe à chaleur ditherme est :

$$e_{PAC} = - \frac{Q_C}{W_{Cycle}}$$



À partir des deux principes appliqués au cycle **réversible**, exprimer l'**efficacité** de la PAC en fonction des températures des deux thermostats.

Calculer e_{PAC} pour $T_F = 10^\circ C$ et $T_C = 20^\circ C$.

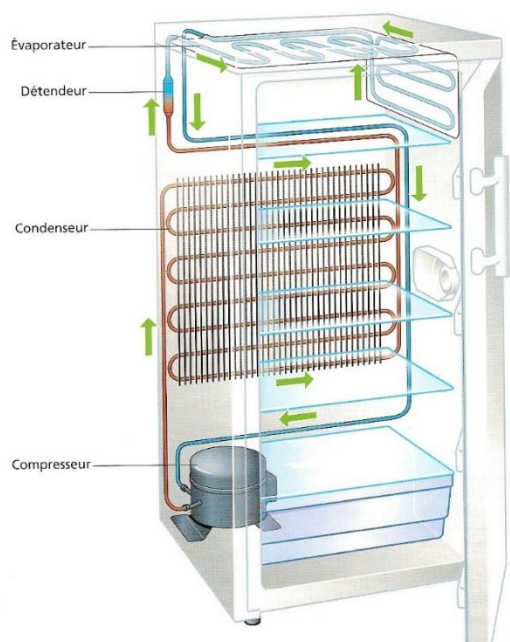
L'efficacité d'une pompe à chaleur fonctionnant selon un cycle de Carnot récepteur est :

$$e_{PAC} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

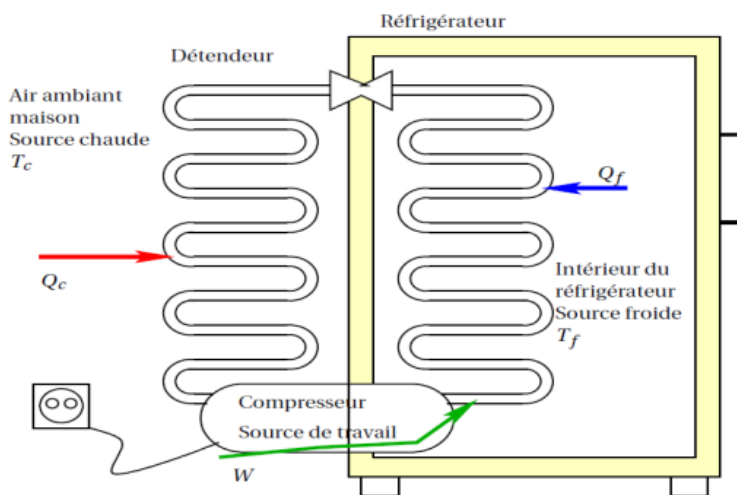
Remarques :

- $e_{PAC} > 1$, on parle aussi de coefficient de performance (COP), en pratique on est plutôt autour de 3 à 4.
- La formule littérale de e_{PAC} est l'inverse de η_{Carnot}
- La PAC est d'autant plus efficace que l'écart de température à maintenir est faible...

3. Principe d'un réfrigérateur



On désire maintenir une basse température à l'intérieur d'un frigo. Pour cela, le condenseur est à l'extérieur du frigo alors que l'évaporateur sera placé à l'intérieur qui joue le rôle de source froide.



Dans le cas d'un réfrigérateur mettant en jeu deux transferts thermiques se faisant au contact de deux thermostats, **le transfert énergétique utile est le transfert thermique prélevé à la source froide Q_F .**

L'efficacité d'un réfrigérateur ditherme est :

$$e_R = \frac{Q_F}{W_{\text{Cycle}}}$$



À partir des deux principes appliqués au cycle **réversible**, exprimer l'**efficacité** du réfrigérateur en fonction des températures des deux thermostats.

Calculer e_{PAC} pour $T_F = 5^\circ \text{C}$ et $T_C = 20^\circ \text{C}$.

L'efficacité d'un réfrigérateur fonctionnant selon un cycle de Carnot récepteur est :

$$e_R = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

Remarques :

- en pratique on est plutôt autour de $e_R = 3-4...$