Leçon III. Machines thermiques

Une machine est un système qui effectue **une conversion d'énergie**. Les premières machines étaient purement mécanique : levier, poulie, chariot, moulin. Elles permettaient de convertir l'énergie fournie par un homme, un animal, le vent ou l'eau en énergie potentielle ou en énergie cinétique.

Au XIX$^{\text{ème}}$, les première machine à vapeur apparaissent, elles permettent d'utiliser "la puissance motrice du feu", comme l'a théorisé Sadi Carnot.

Encore aujourd'hui, les appareils et installations qui nous entourent, moteurs à essence, moteur Diesel, réfrigérateur, centrale nucléaire, etc. sont étudiées à la manière de Carnot, non pas comme des parties séparées mais dans leur globalité : des systèmes permettant la conversion de l'énergie thermique, soit **des machines thermiques**.

Nous allons voir dans cette leçon comment étudier des machines thermiques dithermes.

III.1. Machines thermiques dithermes

III.1.a Notations

On considère une machine thermique notée M.

Cette machine est ditherme, c'est-à-dire qu'elle peut échanger du transfert thermique avec **deux thermostats** de température T_{ch} et de température T_{fr}. Ces notations correspondent aux températures **d'une source froide et d'une source chaude**. Les transferts thermiques de ces sources sont notés Q_{ch} et Q_{fr}, et, la machine thermique étant le système étudié, ils sont comptés positivement s'ils sont reçus par M.

La machine M peut aussi échanger du travail mécanique avec un **système mécanique** noté SM. De même, le transfert mécanique W est compté positivement s'il est reçu par M.

Le schéma présenté Figure 1 résume les notations et les sens des transferts d'énergie.

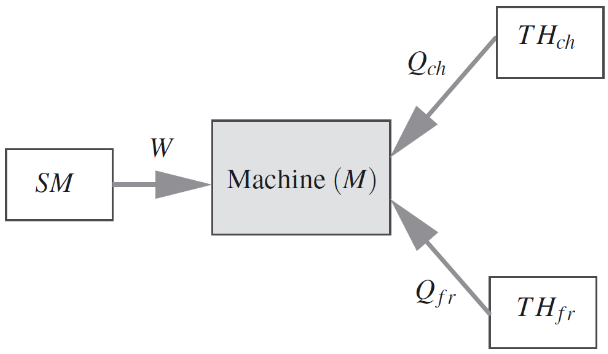

FIGURE 1 – Schéma d'une machine thermique

III.1.b Inégalité de Clausius

Les transformations au coeur de la machine sont des **cycles**, ainsi les variations des grandeurs d'état que sont l'énergie interne U et l'entropie S du système sont telles que

$$\Delta U = U_i - U_i = 0$$
$$\Delta S = S_i - S_i = 0.$$

Les cycles imposent que les variations des grandeurs d'état soient nulles.

Si on applique les deux principes de la thermodynamique à la machine M il vient alors que

$$\Delta U = 0 = W + Q_{ch} + Q_{fr}$$
$$\Delta S = 0 = S_r + S_c = \frac{Q_{ch}}{T_{ch}} + \frac{Q_{fr}}{T_{fr}} + S_c.$$

D'après le deuxième principe, il vient que

$$S_c = -\left(\frac{Q_{ch}}{T_{ch}} + \frac{Q_{fr}}{T_{fr}}\right) \geq 0$$

soit

$$\boxed{\frac{Q_{ch}}{T_{ch}} + \frac{Q_{fr}}{T_{fr}} \leq 0.}$$

C'est ce qu'on appelle **l'inégalité de Clausius**. Dans le cas d'un cycle constitué de transformation réversible, cette inégalité devient une égalité.

III.1.c Les deux types de machines dithermes

La première possibilité est que la machine **reçoive de l'énergie de la source chaude** $Q_{ch} > 0$ **et en donne à la source froide** $Q_{fr} < 0$.

Ce qu'elle reçoit en plus par rapport à **ce qu'elle cède est transformé en travail**.

La machine est dans ce cas **un moteur** $W > 0$. On voit que les tranferts d'énergie thermiques ont un sens naturel, du chaud vers le froid.

La deuxième possibilité est que **la machine reçoive du travail** $W > 0$.

Il est alors possible qu'elle donne du transfert thermique à la source chaude $Q_{ch} < 0$ et reçoive du transfert thermique de la source froide $Q_{fr} > 0$. La machine sert dans ce cas à chauffer la source chaude (pompe à chaleur qui reçoit la chaleur de l'extérieur source froide pour la céder à l'intérieur source chaude $Q_{ch} < 0$) ou bien à refroidir la source froide (machine frigorifique ou climatiseur qui prélève de la chaleur de l'intérieur source froide pour la céder à l'extérieur source chaude $Q_{fr} > 0$).

Ce transfert thermique de sens contraire au sens naturel nécessite l'apport de travail à la machine.

III.2. Moteur thermique

III.2.a Rendement du moteur

La définition générale d'un rendement noté ρ est

$$\rho = \left|\frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}}\right|.$$

Dans le cas du moteur l'énergie utile est le travail mécanique $W < 0$: le but d'un moteur est qu'on utilise son travail mécanique.

L'énergie qu'il faut payer pour obtenir ce travail, soit l'énergie coûteuse, c'est la chaleur de la source chaude $Q_{ch} > 0$.

Le rendement d'un moteur est donc

$$\boxed{\rho_{moteur} = \left|\frac{W}{Q_{ch}}\right| = -\frac{W}{Q_{ch}}.}$$

Or d'après le premier principe

$$\Delta U = 0 = W + Q_{ch} + Q_{fr}$$

donc

$$-W = Q_{ch} + Q_{fr}$$

donc

$$\rho_{moteur} = 1 + \frac{Q_{fr}}{Q_{ch}}.$$

Or si on multiple l'équation du deuxième principe par T_{fr}/Q_{ch} il vient que

$$\Delta S = 0 = \left(\frac{Q_{ch}}{T_{ch}} + \frac{Q_{fr}}{T_{fr}} + S_c\right) \times \frac{T_{fr}}{Q_{ch}}$$

soit

$$0 = \frac{T_{fr}}{T_{ch}} + \frac{Q_{fr}}{Q_{ch}} + S_c \frac{T_{fr}}{Q_{ch}}$$

donc

$$\frac{Q_{fr}}{Q_{ch}} = -\frac{T_{fr}}{T_{ch}} - S_c \frac{T_{fr}}{Q_{ch}}$$

soit finalement

$$\rho_{moteur} = 1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}} - S_c \frac{T_{fr}}{Q_{ch}} > 0.$$

III.2.b Théorème de Carnot

D'après le deuxième principe $Sc \geq 0$, et comme pour un moteur $Q_{ch} > 0$, il vient que

$$S_c \frac{T_{fr}}{Q_{ch}} \geq 0.$$

Ainsi le rendement d'un moteur respecte l'inégalité suivante

$$\rho_{moteur} \leq 1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}}.$$

♥ Définition

Le théorème de Carnot implique que le rendement d'un moteur ditherme réversible, donc pour lequel $S_c = 0$, est

$$\rho_{moteur,rev} = \frac{T_{fr}}{T_{fr} - T_{ch}} = 1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}}.$$

Ce rendement est appelé **rendement de Carnot**, c'est le rendement maximal atteignable avec des source froide et chaude de températures T_{fr} et T_{ch}.

On constate, que pour **améliorer le rendement d'un moteur** impliquant des transformations irréversibles, il faut **augmenter la différence de température entre les sources.**

III.2.c Ordres de grandeur

On retiendra deux exemples.

- Pour une centrale électrique nucléaire, pouvant être modélisée par une machine thermique fournissant du travail électrique et travaillant avec, comme source chaude, le réacteur de température $T_{ch} = 600\,\mathrm{K}$ et, comme source froide, , l'eau d'une rivière de température $T_{fr} = 300\,\mathrm{K}$, le rendement de Carnot est égal à 0,5. En pratique le rendement est compris entre 30 et 40%. Il est plus faible que le rendement de Carnot en raison des irréversibilités et de diverses pertes.
- Dans le cas d'un moteur de voiture, la source froide est l'air atmosphérique, de température typique $T_{fr} = 300\,\mathrm{K}$, et la source chaude est représenté par les gaz en combustion de température typique $T_{fr} = 3000\,\mathrm{K}$. Pour ces valeurs le rendement de Carnot vaut 0,9. En pratique une valeur typique de rendement est 35% pour un moteur à essence et 45% pour un moteur Diesel.

III.3. Machine frigorifique

III.3.a Efficacité de la machine frigorifique

Le but d'une machine frigorifique est de produire du froid. Il s'agit donc refroidir la source froide, soit de prendre du transfert thermique à la source froide, soit d'obtenir un transfert thermique $Q_{fr} > 0$: **c'est l'énergie utile**. La grandeur coûteuse est le travail $W > 0$ fourni à la machine.

Dans le cas de machine frigorifique, on n'utilise pas le rendement mais **l'efficacité**, définie telle que

$$e_{frigo} = \left| \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}} \right|$$

soit ici

$$\boxed{e_{frigo} = \left| \frac{Q_{fr}}{W} \right| = \frac{Q_{fr}}{W}.}$$

Or d'après le premier principe

$$\Delta U = 0 = W + Q_{ch} + Q_{fr}$$

donc

$$W = -(Q_{ch} + Q_{fr})$$

donc

$$e_{frigo} = -\frac{Q_{fr}}{Q_{ch} + Q_{fr}} = -\frac{1}{1 + \frac{Q_{ch}}{Q_{fr}}}.$$

Or si on multiple l'équation du deuxième principe par T_{ch}/Q_{fr} il vient que

$$\Delta S = 0 = \left(\frac{Q_{ch}}{T_{ch}} + \frac{Q_{fr}}{T_{fr}} + S_c \right) \times \frac{T_{ch}}{Q_{fr}}$$

soit

$$0 = \frac{Q_{ch}}{Q_{fr}} + \frac{T_{ch}}{T_{fr}} + S_c \frac{T_{ch}}{Q_{fr}}$$

donc

$$\frac{Q_{ch}}{Q_{fr}} = -\frac{T_{ch}}{T_{fr}} - S_c \frac{T_{ch}}{Q_{fr}}$$

soit finalement

$$e_{frigo} = \frac{1}{\frac{T_{ch}}{T_{fr}} + S_c \frac{T_{ch}}{Q_{fr}} - 1} \geq 0..$$

D'après le deuxième principe $S_c \geq 0$, et comme pour un moteur $Q_{fr} > 0$, il vient que

$$S_c \frac{T_{ch}}{Q_{fr}} \geq 0.$$

Ainsi l'efficacité de la machine thermique respecte l'inégalité suivante

$$e_{frigo} \leq \frac{1}{\frac{T_{ch}}{T_{fr}} + -1} = \frac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}}.$$

♥ Définition

Le théorème de Carnot implique que le rendement d'une machine frigorifique ditherme réversible, donc pour lequel $S_c = 0$, est

$$e_{frigo} = \frac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}}.$$

Il s'agit de l'efficacité maximale atteignable avec des source froide et chaude de températures T_{fr} et T_{ch}.

On constate, que **pour améliorer l'efficacité d'une machine frigorifique** impliquant des transformations irréversibles, **il faut diminuer la différence de température entre les sources.**

III.3.b Ordres de grandeur

On retiendra deux exemples.

- Pour un congélateur domestique, pouvant être modélisée par une machine thermique thermique ditherme avec pour source froide l'intérieur du congélateur, à la température $T_{fr} = 255\,\mathrm{K}$ et, comme source chaude, l'air extérieur de température $T_{ch} = 300\,\mathrm{K}$, l'efficacité réversible est $e_{frigo,rec} = 5,7$. En pratique l'efficacité est au mieux voisine de 2.
- Pour un réfrigérateur domestique, pouvant être modélisée par une machine thermique thermique ditherme avec pour source froide l'intérieur du réfrigérateur, à la température $T_{fr} = 266\,\mathrm{K}$ et, comme source chaude, l'air extérieur de température $T_{ch} = 300\,\mathrm{K}$, l'efficacité réversible est $e_{frigo,rec} = 7,8$. Cette efficacité plus importante est du au fait que les température des sources sont plus proches.

III.4. Pompe à chaleur

III.4.a Efficacité de la pompe à chaleur

Le but d'une pompe à chaleur est de fournir de la chaleur à la source chaude (réchauffer l'intérieur source chaude en prenant de la chaleur à l'extérieur source froide). La grandeur utile est donc $Q_{ch} < 0$. La grandeur coûteuse est le travail $W > 0$ fourni à la machine.

Dans le cas de la pompe à chaleur, on n'utilise pas le rendement mais **l'efficacité**, définie telle que

$$e_{pac} = \left| \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}} \right|$$

soit ici

$$\boxed{e_{pac} = \left| \frac{Q_{ch}}{W} \right| = -\frac{Q_{ch}}{W}.}$$

Or d'après le premier principe

$$\Delta U = 0 = W + Q_{ch} + Q_{fr}$$

donc

$$W = -(Q_{ch} + Q_{fr})$$

donc

$$e_{pac} = \frac{Q_{ch}}{Q_{ch} + Q_{fr}} = \frac{1}{1 + \frac{Q_{fr}}{Q_{ch}}}.$$

Or si on multiple l'équation du deuxième principe par T_{fr}/Q_{ch} il vient que

$$\Delta S = 0 = \left(\frac{Q_{ch}}{T_{ch}} + \frac{Q_{fr}}{T_{fr}} + S_c \right) \times \frac{T_{fr}}{Q_{ch}}$$

soit

$$0 = \frac{T_{fr}}{T_{ch}} + \frac{Q_{fr}}{Q_{ch}} + S_c \frac{T_{fr}}{Q_{ch}}$$

donc

$$\frac{Q_{fr}}{Q_{ch}} = -\frac{T_{fr}}{T_{ch}} - S_c \frac{T_{fr}}{Q_{ch}}$$

soit finalement

$$e_{pac} = \frac{1}{1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}} - S_c \frac{T_{fr}}{Q_{ch}}} \geq 0..$$

D'après le deuxième principe $S_c \geq 0$, et comme pour un moteur $Q_{ch} < 0$, il vient que

$$-S_c \frac{T_{ch}}{Q_{ch}} \geq 0.$$

Ainsi l'efficacité de la machine thermique respecte l'inégalité suivante

$$e_{pac} \leq \frac{1}{1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}}} = \frac{T_{ch}}{T_{ch} - T_{fr}}.$$

♥ Définition

Le théorème de Carnot implique que le rendement d'une pompe à chaleur ditherme réversible, donc pour lequel $S_c = 0$, est

$$e_{pac,rev} = \frac{T_{ch}}{T_{ch} - T_{fr}}.$$

Il s'agit de l'efficacité maximale atteignable avec des source froide et chaude de températures T_{fr} et T_{ch}.

On constate, que **pour améliorer l'efficacité d'une pompe à chaleur** impliquant des transformations irréversibles, **il faut diminuer la différence de température entre les sources.**

III.4.b Ordres de grandeur

Une pompe à chaleur, utilisée pour chauffer une maison en hiver, travaille avec l'eau du circuit de chauffage pour source chaude et l'air à l'extérieur de la maison pour source froide. Ainsi, on chauffe la maison en refroidissant le jardin. L'efficacité e_{pac} diminue avec l'écart des températures des deux sources. C'est pourquoi il est préférable d'avoir un chauffage par le sol (eau à $T_{ch} = 35\,°\mathrm{C}$) plutôt que par radiateur (eau à $T_{ch} = 60\,°\mathrm{C}$). On trouve dans la notice d'une pompe à chaleur le coefficient d'efficacité, appelé COP dans ce contexte, correspondant à $T_{ch} = 35\,°\mathrm{C}$ et $T_{fr} = 7\,°\mathrm{C}$. Le COP varie entre 3 et 5. La pompe à chaleur est de classe A selon les normes européennes si son COP est supérieur à 3,65. La valeur maximale théorique correspondant aux températures précédentes est

$$e_{pac,rev} = \frac{273+35}{273+35-273-7} = 11.$$

La différence entre $e_{pac,rev}$ et le COP réel est due au fait que la machine réelle n'est pas réversible, mais aussi à la consommation d'énergie pour des tâches annexes.

III.5. Cogénération

Afin de produire de l'électricité les centrales électriques utilisent des moteurs. Le travail mécanique W du moteur est transformé en travail électrique W_{elec} avec une certaine efficacité (on verra au chapitre suivant comment réaliser une telle conversion).

Comme on l'a vu plus tôt, la production de travail mécanique par un moteur $W < 0$ s'accompagne de la consommation d'énergie thermique par le moteur depuis la source chaude $Q_{ch} > 0$, et la production d'énergie thermique par le moteur vers la source froide $Q_{fr} < 0$.

On a réalisé que cette énergie thermique produit par le moteur $Q_{fr} < 0$ pouvait être exploité pour d'autres utilisation comme le chauffage d'un bâtiment ou la production d'eau chaude. C'est ce qu'on appelle la **cogénération**.

Dans ce cas le rendement de la machine

$$\rho = \left| \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}} \right|$$

devient

$$\rho = -\frac{(W + Q_{fr})}{Q_{ch}}.$$

Par exemple pour deux centrales électrique et thermiques séparées, les rendements séparés sont

$$\rho_{elec} = -\frac{W_{lec}}{Q_{ch1}} = \frac{35\,\mathrm{kW}}{100\,\mathrm{kW}}$$

$$\rho_{therm} = -\frac{Q_{fr2}}{Q_{ch2}} = \frac{55\,\mathrm{kW}}{60\,\mathrm{kW}}$$

soit un rendement total

$$\rho = -\frac{(W_{lec} + Q_{fr2})}{Q_{ch1} + Q_{ch2}} = \frac{90\,\mathrm{kW}}{160\,\mathrm{kW}} = 56\%.$$

Tandis qu'avec une seule centrale utilisant la cogénération électrique et thermique, le rendement est

$$\rho_{cog} = -\frac{(W_{lec} + Q_{fr2})}{Q_{ch1}} = \frac{90\,\mathrm{kW}}{100\,\mathrm{kW}} = 90\%.$$

♥ Définition

La cogénération est une technique qui consiste à produire, avec une même machine et à partir d'un seul combustible (combustible), de l'électricité et de la chaleur. Elle permet d'obtenir un rendement global (électricité-thermique) plus élevé que celui résultant d'une production par filière séparée.

Synthèse

Connaissances

- Application du premier principe et du deuxième principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.

Savoir-faire

- **Donner** le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.
- **Analyser** un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme.
- **Définir** un rendement ou une efficacité et les relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. **Justifier** et utiliser le théorème de Carnot.
- **Citer** quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles. **Expliquer** le principe de la cogénération.