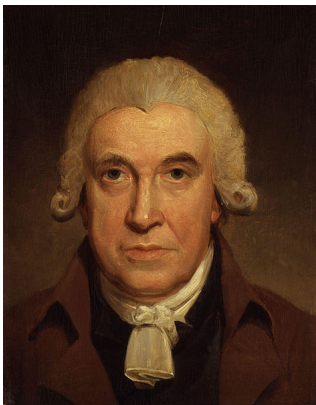


7 – MACHINES THERMIQUES

HISTORIQUEMENT, c'est avec l'invention des machines thermiques que la thermodynamique est née en tant que science. Les notions de température, d'énergie, de travail et de chaleur, ont été introduites pour modéliser le fonctionnement des machines à vapeur, et améliorer leur rendement. La thermodynamique est donc au départ une science d'ingénieurs, dont l'un des plus brillants a été James WATT, à l'origine d'un grand nombre d'amélioration technologiques qui ont permis d'augmenter les performances des machines. Les principes de la thermodynamique ont d'abord visé à justifier ce qui s'est révélé une évidence technologique : il est impossible de réaliser un moteur thermique si on ne prévoit pas un échange de chaleur avec deux sources de températures différentes. C'est ce constat, énoncé par un jeune ingénieur français, Nicolas Sadi CARNOT, qui a inspiré aux physiciens William THOMSON et Rudolf CLAUSIUS le second principe de la thermodynamique.

Toutes les machines thermiques sont basées sur le même principe que la machine à vapeur du 19^e siècle : de l'énergie thermique (issue de la combustion de charbon, de pétrole, ou de la fission nucléaire) est convertie en énergie mécanique (par rotation d'une turbine ou d'un arbre) par l'intermédiaire d'un fluide (liquide ou gaz, par exemple de l'eau ou de l'air) qui subit un cycle de transformations le ramenant à son état initial. Alors que les machines du 19^e siècle étaient toutes des moteurs, c'est-à-dire que leur finalité était de fournir du travail à l'utilisateur, la modélisation thermodynamique a permis d'imaginer des dispositifs fonctionnant en sens inverse, c'est-à-dire de convertir un travail fourni par l'utilisateur en échanges thermiques non spontanés, ce qui est la base des appareils de refroidissements ou des pompe à chaleur.



par Henry HOWARD
National Gallery of Portrait, London

James WATT (1736 - 1819)
ingénieur britannique



Nicolas Sadi CARNOT (1796 - 1832)
ingénieur français

Plan du chapitre

1 Principe des machines thermiques cycliques dithermes	3
1.1 Exemples	3
1.2 Machine thermique cyclique ditherme	4
1.3 Bilan d'énergie d'une machine thermique cyclique ditherme	5
1.4 Inégalité de Clausius	5
1.5 Égalité de Clausius	6
2 Cycles dithermes moteurs	6
2.1 Définition d'un moteur	6
2.2 Exemples	6
2.3 Échanges énergétiques dans un moteur	8
2.4 Efficacité ou rendement d'un moteur	8
2.5 Efficacité maximale et théorème de Carnot	9
3 Cycles dithermes inverses ou récepteurs	10
3.1 Position du problème	10
3.2 Échanges énergétiques dans un récepteur	11
3.3 Efficacité d'une machine frigorifique	12
3.4 Efficacité d'une pompe à chaleur	15
4 Cogénération	16
4.1 Définition et exemples	16
4.2 Efficacité de la cogénération	17

Programme officiel – Deuxième semestre – **Thème E – énergie : conversion et transfert**

NOTIONS	CAPACITÉS EXIGIBLES
E.3. Formulation et application des principes de la thermodynamique à l'étude des machines thermiques. Application du premier principe de la thermodynamique et de l'inégalité de Clausius aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, limitation.	Décrire 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 le relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Citer quelques ordres de grandeur des rendements ou efficacités des machines thermiques réelles actuelles. Expliquer le principe de la cogénération.

L'auteur du présent document vous autorise à le partager, reproduire, distribuer et communiquer selon les conditions suivantes :



- BY** Vous devez le citer en l'attribuant de la manière indiquée par l'auteur (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'il approuve votre utilisation de l'œuvre).
- NC** Vous n'avez pas le droit d'utiliser ce document à des fins commerciales.
- SA** Vous avez le droit de le modifier, de le transformer ou de l'adapter, sous les mêmes conditions de partage et d'utilisation que le présent document.

Consulter la licence creative commons complète en français :
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.fr>

1 Principe des machines thermiques cycliques dithermes

1.1 Exemples

1.1.1 La machine à vapeur

L'exemple historique de machine thermique est la machine à vapeur, qui a permis l'essor de l'industrie au 19^e siècle. Celle-ci est composée de trois parties principales¹ :

- une chaudière dans laquelle on fait passer de l'eau liquide à l'état de vapeur sous pression,
- un cylindre, dans lequel la vapeur se détend en poussant un piston,
- un condenseur, chargé de liquéfier la vapeur, l'eau liquide étant réinjectée dans la chaudière.

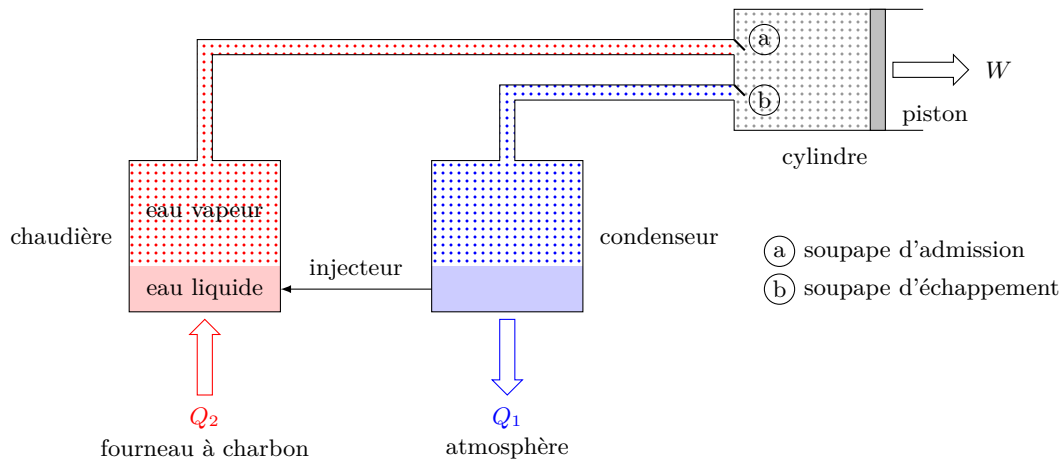


FIGURE 1 – Schéma de principe d'une machine à vapeur.

L'eau liquide subit une transformation cyclique, c'est-à-dire qu'elle revient à chaque fois au même endroit et dans les mêmes conditions thermodynamiques. Au cours de chaque cycle, elle échange de l'énergie avec l'extérieur à trois reprises :

- elle reçoit de l'énergie thermique au niveau de la chaudière, fournie par la combustion de charbon (ou autre combustible), soit $Q_{2\text{reçue}} > 0$,
- elle fournit un travail au niveau du cylindre, lorsqu'elle pousse le piston, soit $W_{\text{reçu}} < 0$,
- elle cède de l'énergie thermique au monde extérieur (usuellement l'atmosphère) au niveau du condenseur, soit $Q_{1\text{reçue}} < 0$.

1.1.2 Centrale nucléaire

Le principe de toute machine thermique, 200 ans après l'invention de la machine à vapeur, est toujours le même. Une centrale nucléaire est constituée d'un circuit secondaire, dans lequel circule de l'eau. Celle-ci subit également une transformation cyclique qui la fait passer par :

- un échangeur dans lequel l'eau liquide est vaporisée,
- une turbine, mise en mouvement de rotation par le passage de la vapeur,
- un condenseur, chargé de liquéfier la vapeur d'eau avant le début d'un nouveau cycle.

Dans l'échangeur, l'eau du circuit secondaire est mise en contact avec un autre fluide dont la nature dépend du type de centrale², qui circule dans le circuit primaire. Ce fluide est chauffé par la réaction de fission nucléaire au niveau du cœur du réacteur. C'est pour éviter les fuites radioactives que l'unique circuit de la machine à vapeur est remplacée par deux circuits séparés.

L'eau liquide du circuit secondaire subit une transformation cyclique, au cours de laquelle elle échange de l'énergie avec l'extérieur :

1. On peut trouver une animation du fonctionnement de la machine à vapeur sur le site de Peter Valdivia : <http://www.petervaldivia.com/technology/mechanisms/steam-engine.php>

2. Dans les premières centrales nucléaires, c'était du dioxyde de carbone ; c'est actuellement de l'eau dans les centrales occidentales. Du sodium fondu a été utilisé dans des prototypes de surgénérateurs aujourd'hui abandonnés.

- elle reçoit de l'énergie thermique au niveau de l'échangeur, soit $Q_{2\text{ regue}} > 0$,
- elle fournit un travail au niveau de la turbine, soit $W_{\text{regu}} < 0$,
- elle cède de l'énergie thermique au monde extérieur (l'atmosphère, la mer ou une rivière) au niveau du condenseur, soit $Q_{1\text{ regue}} < 0$.

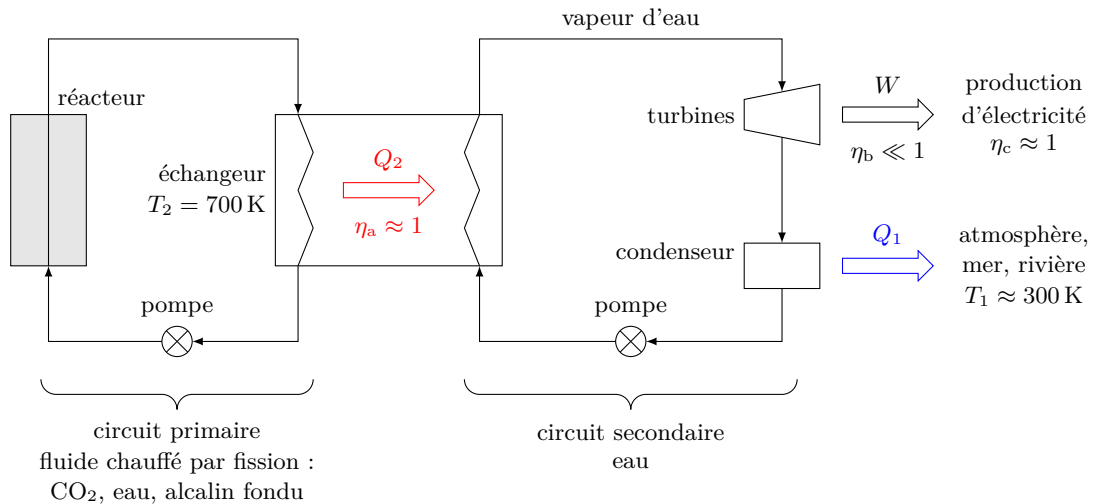


FIGURE 2 – Schéma de principe d'une centrale nucléaire.

La conversion de l'énergie nucléaire produite dans le circuit primaire en énergie thermique au niveau du circuit secondaire se fait avec un rendement η_a proche de 100%. De même, le travail de la turbine est converti en énergie électrique avec un rendement η_c proche de 100%. En revanche, la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique au niveau de la turbine se fait avec un rendement médiocre de l'ordre de $\eta_b \approx 30\%$. Il est d'autant plus grand que T_2 est grande, la température T_1 étant généralement imposée (atmosphère, rivière, mer...). Cependant, on ne peut l'augmenter trop du fait des risques d'emballement du réacteur. Dans un surgénérateur, on atteint $T_2 = 700\text{ K}$.

1.2 Machine thermique cyclique ditherme

Les machines mises au point à partir de la fin du 18^{ème} siècle mettaient toutes en jeu un fluide qui échange de la chaleur avec deux sources de température différentes à deux moments différents du cycle. C'est Sadi CARNOT qui a mis en lumière ce trait commun à toutes les machines.

Dans une machine thermique, les échanges d'énergie se font par l'intermédiaire d'un fluide, appelé le **fluide caloporteur** (ou le fluide frigorigène dans les machines frigorifiques). Dans la plupart des machines, le fluide caloporteur circule dans un circuit fermé, autrement dit subit une suite de transformations à l'issue desquelles il revient à son état initial.

On appelle **source** une partie du monde extérieur avec laquelle le fluide caloporteur échange de l'énergie sous forme de transfert thermique. Deux situations sont possibles en fonction de la taille de la source :

- si une source est un thermostat, sa température reste constante au cours du fonctionnement ;
- si une source est de dimension petite, sa température varie à chaque cycle de fonctionnement, et elle est qualifiée de pseudo-source.

Il a été constaté expérimentalement, avant son énoncé par CARNOT, qu'une machine ne peut fournir du travail que si le fluide caloporteur échange de l'énergie thermique au moins deux fois avec deux sources différentes, autrement dit, il est impossible de réaliser un moteur en utilisant un fluide caloporteur qui n'échangerait de l'énergie thermique qu'une seule fois au cours de son cycle de fonctionnement. Cette constatation empirique est l'énoncé originel du second principe de la thermodynamique, qui a ensuite été décliné de nombreuses façons différentes au cours du 19^{ème} siècle, pour finir par sa formulation la plus théorique, qui introduit la fonction

entropie³. La nécessité de deux sources est en fait une conditions générale pour toutes les machines. En définitive, dans une machine thermique **ditherme**, le fluide caloporteur échange de l'énergie thermique avec deux sources différentes :

- la source de température la plus haute est appelée **source chaude**,
- la source de température la plus basse est appelée **source froide**.

1.3 Bilan d'énergie d'une machine thermique cyclique ditherme

Dans une machine thermique cyclique ditherme, le réalise fluide caloporteur subit un cycle de transformations au cours duquel il reçoit :

- un transfert thermique $Q_{2\text{ reçu}}$ au contact de la source chaude de température T_2 ,
- un transfert thermique $Q_{1\text{ reçu}}$ au contact de la source froide de température $T_1 < T_2$,
- un travail $W_{\text{reçu}}$.

Dans toutes les formules du cours, le système est le fluide caloporteur ; les grandeurs $Q_{1\text{ reçu}}$, $Q_{2\text{ reçu}}$ et $W_{\text{reçu}}$ sont les transferts d'énergies reçus par le fluide caloporteur au cours d'un cycle. Les signes de ces trois grandeurs, c'est-à-dire le sens des échanges d'énergie, dépendent de la nature de la machine (moteur, réfrigérateur, pompe à chaleur).

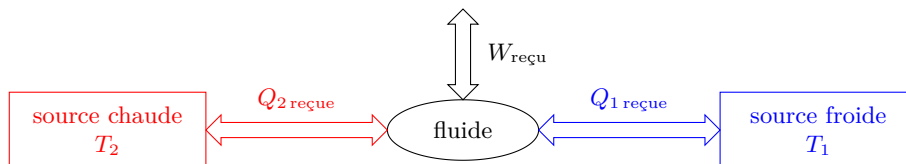


FIGURE 3 – Échanges d'énergie dans un cycle ditherme.

Pour le système constitué du fluide caloporteur, à l'issue d'un nombre entier de cycles de fonctionnement, il revient à son état initial, autrement dit son énergie interne est inchangée. L'application du premier principe sur un nombre entier de cycles de fonctionnement s'écrit donc :

$$\Delta U = W_{\text{reçu}} + Q_{1\text{ reçu}} + Q_{2\text{ reçu}} = 0 \quad (1)$$

Pour le système constitué du fluide caloporteur, un cycle de fonctionnement correspond à une évolution très petite du système ; sur un cycle, et l'égalité précédente peut se décliner sous forme infinitésimale, qui n'est utile en pratique que pour l'étude des machines fonctionnant avec une pseudo-source (source de température variable) :

$$dU = \delta W_{\text{reçu}} + \delta Q_{1\text{ reçu}} + \delta Q_{2\text{ reçu}} = 0 \quad (2)$$

1.4 Inégalité de Clausius

On constate que, pour toute machine thermique cyclique ditherme, sur un nombre entier de cycles de transformation du fluide caloporteur, les échanges thermiques du fluide avec les sources sont tels que :

$$\frac{Q_{1\text{ reçu}}}{T_1} + \frac{Q_{2\text{ reçu}}}{T_2} \leq 0 \quad (3)$$

Cette constatation expérimentale est connue sous le nom d'**inégalité de Clausius**, et constitue un énoncé possible du second principe de la thermodynamique. Elle n'est donc pas démontrée, mais jusqu'à preuve du contraire, elle n'a jamais été mise en défaut⁴.

3. Ceci sera abordé en seconde année.

4. Si l'inégalité de Clausius se révélait fausse, le second principe de la thermodynamique devrait être abandonné. Cela poserait des problèmes théoriques considérables, car ce principe est celui qui justifie qu'il n'y a pas de mouvement perpétuel, qu'il n'y a pas d'énergie infinie, et qu'il n'est pas possible de remonter le temps.

Sur un cycle de fonctionnement, on peut écrire une forme infinitésimale, utile dans le cas d'une pseudo-source :

$$\boxed{\frac{\delta Q_{1 \text{ reçue}}}{T_1} + \frac{\delta Q_{2 \text{ reçue}}}{T_2} \leq 0} \quad (4)$$

1.5 Égalité de Clausius

On dit que la machine fonctionne de façon réversible lorsque l'égalité de Clausius est vérifiée :

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_{1 \text{ reçue}}}{T_1} + \frac{Q_{2 \text{ reçue}}}{T_2} &= 0 \\ \frac{\delta Q_{1 \text{ reçue}}}{T_1} + \frac{\delta Q_{2 \text{ reçue}}}{T_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ si réversible}$$

Le **fonctionnement réversible** au sens thermodynamique de ce terme, correspond à un fonctionnement idéal, au cours duquel il n'y aurait aucune dissipation intempestive d'énergie, en particulier par frottement. Cela ne signifie pas qu'on obtienne un rendement de 100%, mais qu'on obtient le rendement maximal théorique possible du fait des contraintes imposées par le second principe de la thermodynamique.

Un fonctionnement réversible ne peut pas correspondre à une machine réellement utilisable. En effet, toute machine comporte des pièces mobiles qui réalisent l'échange de travail mécanique (turbine, compresseur, piston, etc). Or, tout mouvement d'un solide par rapport à un autre implique l'existence de frottements, qui ne sont nuls que pour des déplacements à vitesse infiniment lente. Autrement dit, un moteur de voiture serait réversible si les roues tournaient à vitesse quasiment nulle, ce qui limite notablement l'intérêt du dispositif!

2 Cycles dithermes moteurs

2.1 Définition d'un moteur

Le principe d'un moteur est de réaliser un mouvement, autrement dit d'obtenir un déplacement d'ensemble d'un système, qu'il s'agisse d'une pièce mécanique (piston, turbine, moulin, etc) ou d'un courant électrique. En d'autres termes, on cherche à réaliser un échange d'énergie sous forme de travail au profit de l'utilisateur.

Un **moteur** ou **machine motrice** est un dispositif permettant à l'utilisateur de récupérer du travail.

On a déjà présenté la centrale nucléaire, qui produit du travail électrique, et la machine à vapeur qui produit du travail mécanique.

2.2 Exemples

2.2.1 Le moteur à quatre temps

Dans un moteur à explosion, la détonation d'un mélange de carburant et d'air dans un cylindre entraîne la mise en translation d'un piston. Dans un véhicule, ce mouvement de translation est converti en mouvement de rotation d'un arbre lié aux roues par l'intermédiaire d'un système bielle-manivelle. Le fluide est le mélange de carburant et d'air. Le volume du cylindre est initialement à sa valeur minimale $V_{\min}$, le piston étant repoussé au maximum dans le cylindre⁵.

5. La figure 4 provient d'un site aujourd'hui disparu. Des animations permettant de visualiser le fonctionnement du moteur à 4 temps sont visibles en ligne : http://www.petervaldivia.com/technology/mechanisms/4_stroke_engine.php (site de Peter Valdivia), <http://www.animatedengines.com/otto.html> (site *AnimatedEngines*).

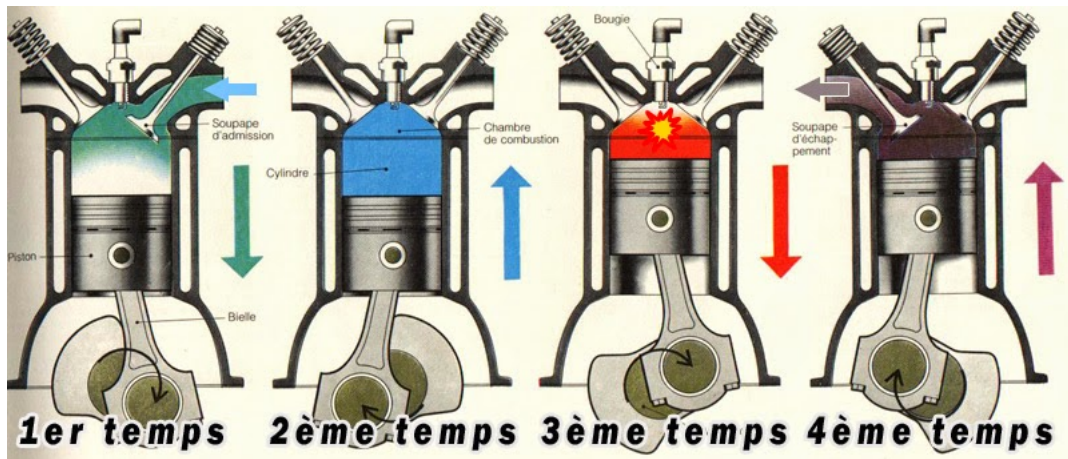


FIGURE 4 – Principe du moteur à 4 temps.

Les « quatre temps » correspondent à quatre états successifs du cylindre au cours du cycle de fonctionnement.

- **Admission.** La soupape d'admission étant ouverte, le mélange d'air et de carburant est aspiré dans le cylindre lors de la translation du piston. Le volume du cylindre atteint sa valeur maximale $V_{\max}$.
- **Soupape d'admission fermée,** le mélange est comprimé par retour du piston à sa position initiale. Le volume du mélange d'air et de carburant est $V_{\min}$.
- **Allumage.** La bougie provoque une étincelle qui déclenche la réaction de combustion du carburant. Cette réaction est fortement exothermique, ce qui provoque une augmentation de la température, c'est-à-dire que le fluide reçoit une chaleur Q_2 . La source chaude est donc le fluide lui-même au moment de la réaction exothermique d'explosion.
- **L'élévation de température et de pression due à l'explosion** entraîne une détente brusque des gaz brûlés. Le piston est alors repoussé à sa valeur $V_{\min}$. Le fluide fournit alors un travail au piston.
- **Échappement.** Soupape d'échappement ouverte, le retour du piston expulse les gaz brûlés, qui se refroidissent au contact de l'atmosphère (source froide). Le cylindre revient à sa position initiale.

Le contenu du cylindre subit bien une transformation cyclique, mais il faut noter deux différences avec la machine à vapeur. D'une part, la nature du fluide change au cours du cycle : avant l'allumage, il s'agit d'un mélange de carburant et d'air, après l'allumage, il reste les gaz brûlés (CO_2 et H_2O), le carburant non brûlé, le diazote de l'air, ainsi que des oxydes d'azote formés au cours de l'explosion. D'autre part, la fluide est expulsé à chaque fin de cycle, le cylindre étant rechargé en fluide au début du cycle suivant. Cependant, d'un cycle à l'autre, les mêmes phénomènes se répètent dans le cylindre.

2.2.2 La turbine à combustion

Une turbine à combustion est une machine thermique ditherme qui, comme le moteur à explosion, fonctionne sur un pseudo-cycle puisque le fluide ne circule pas dans un circuit fermé. Le principe est montré sur la figure ci-contre ⁶.

De l'air est amené sous pression à une chambre de combustion dans laquelle un flux continu de combustible réalise une combustion permanente (contrairement au moteur à 4 temps). Les gaz brûlés sont expulsés à travers un ensemble de pâles qui sont ainsi mises en rotation. Pour une utilisation dans une centrale de production d'électricité, la rotation des pâles est associée à un aimant tournant, ce qui produit du courant alternatif.

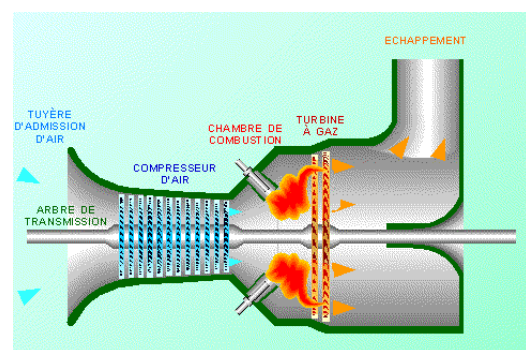


FIGURE 5 – Turbine à combustion.

6. Figure réalisée par Daniel Bonnerue disponible à l'adresse : https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_%C3%A0_gaz.

Une partie de l'énergie cinétique de rotation des pâles est utilisée pour faire tourner l'arbre du compresseur à l'entrée de la turbine.

2.2.3 Turboréacteur

Le turboréacteur, utilisé dans l'aviation, est une variante de la turbine à combustion⁷. Les gaz brûlés servent à faire tourner l'arbre du compresseur d'entrée, mais le réacteur est surtout conçu pour maximiser l'énergie cinétique des gaz à la sortie : l'éjection des gaz vers l'arrière entraîne l'avion vers l'avant par conservation de la quantité de mouvement totale⁸.

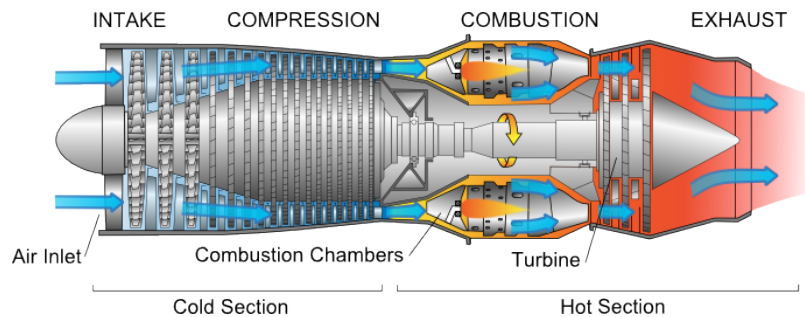


FIGURE 6 – Principe du turboréacteur.

2.3 Échanges énergétiques dans un moteur

On a constaté depuis le 18^e siècle que, pour réaliser un moteur, c'est-à-dire un système dans lequel le fluide fournit du travail au monde extérieur, il faut nécessairement que le fluide reçoive de l'énergie thermique lors de son contact avec la source chaude, et cède de l'énergie thermique au contact de la source froide. Les échanges énergétiques pour une machine motrice ditherme sont toujours ceux de la figure 7, dans lequel les flèches sont dans le sens réel des échanges, mais les grandeurs $Q_{1\text{reçu}}$, $Q_{2\text{reçu}}$ et $W_{\text{reçu}}$ sont comptabilisés par rapport au fluide caloporteur.

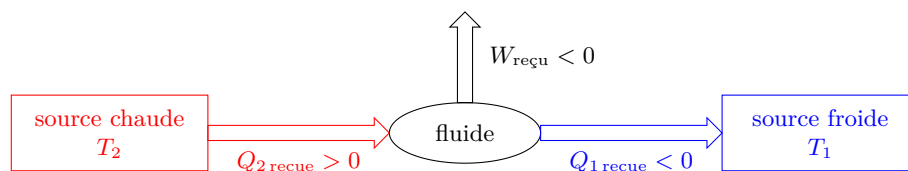


FIGURE 7 – Échanges d'énergie dans un cycle ditherme moteur.

2.4 Efficacité ou rendement d'un moteur

L'efficacité d'un moteur et plus généralement d'une machine compare l'énergie utile récupérée par l'utilisation (autrement dit l'échange énergétique pour lequel la machine a été conçue), et l'énergie que l'utilisateur a dû dépenser, et donc payer.

On appelle **efficacité** d'une machine thermique le rapport entre l'énergie utile récupérée et l'énergie coûteuse, c'est-à-dire celle que l'utilisateur doit dépenser.

7. Une description plus poussée du turboréacteur est disponible sur le site de Peter Valdivia : <https://www.petervaldivia.com/turbo-jet/>

8. C'est une variante de l'expérience de Tolkovski, présentés dans le chapitre sur la dynamique.

L'utilisateur souhaite récupérer le travail fourni par le fluide, soit $-W_{\text{reçu}}$. Or, il doit apporter au fluide l'énergie thermique $Q_{2\text{reçu}}$, en faisant brûler du charbon dans la chaudière, ou en réalisant une fission nucléaire dans le réacteur de la centrale. L'**efficacité énergétique** du moteur s'écrit alors :

$$e = \frac{-W_{\text{reçu}}}{Q_{2\text{reçu}}} \quad (5)$$

Comme on va le voir, cette grandeur est toujours comprise entre 0 et 1, et a donc historiquement été appelé le rendement du moteur⁹.

Notons qu'il est toujours possible d'exprimer l'efficacité énergétique uniquement à l'aide des échanges thermiques reçus. En effet, le premier principe appliqué sur un cycle s'écrit : $Q_{1\text{reçu}} + Q_{2\text{reçu}} = -W_{\text{reçu}}$, donc :

$$e = \frac{Q_{1\text{reçu}} + Q_{2\text{reçu}}}{Q_{2\text{reçu}}} = 1 + \frac{Q_{1\text{reçu}}}{Q_{2\text{reçu}}}$$

On donne quelques valeurs de rendements réels de machines actuellement utilisées, dont les ordres de grandeur sont à connaître.

- Moteur à 4 temps : jusqu'à $\approx 35\%$ mais généralement 25% .
- Moteur Diesel : jusqu'à 42% .
- Centrale nucléaire : ≈ 30 à 35% .
- Centrale thermique à combustion : $\approx 40\%$.

La définition de l'efficacité peut aussi se faire en utilisant les puissances échangées plutôt que les énergie. En appliquant le premier principe en termes de puissance, on a alors :

$$e = \frac{-P_W}{P_{Q2}} = 1 + \frac{P_{Q1}}{P_{Q2}}$$

2.5 Efficacité maximale et théorème de Carnot

On sait que l'inégalité de Clausius entraîne des contraintes sur les valeurs des échanges thermiques. Évaluons la contrainte sur le rapport $Q_{1\text{reçu}}/Q_{2\text{reçu}}$ qui apparaît dans l'efficacité du moteur :

$$\frac{Q_{1\text{reçu}}}{T_1} + \frac{Q_{2\text{reçu}}}{T_2} \leq 0 \Rightarrow \frac{Q_{1\text{reçu}}}{T_1} \leq -\frac{Q_{2\text{reçu}}}{T_2}$$

En se rappelant que $Q_{2\text{reçu}} > 0$, ceci conduit à :

$$\frac{Q_{1\text{reçu}}}{Q_{2\text{reçu}}} \leq -\frac{T_1}{T_2} \Rightarrow 1 + \frac{Q_{1\text{reçu}}}{Q_{2\text{reçu}}} \leq 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Le membre de gauche de l'inégalité est l'efficacité du moteur, qui apparaît donc toujours inférieure à une valeur limite, qui est sa valeur maximale possible. En définitive, l'efficacité d'une machine ditherme motrice fonctionnant entre une source froide de température T_1 et une source chaude de température T_2 est toujours inférieure à une valeur maximale telle que :

$$e \leq e_{\text{max}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (6)$$

L'efficacité maximale correspond au cas où l'égalité de Clausius est vérifiée, autrement dit au fonctionnement réversible de la machine motrice. On constate que cette efficacité maximale est indépendante du moteur lui-même : ni la conception technologique, ni la nature du fluide caloporteur n'interviennent. Ceci est en fait général à toutes les machines thermiques cycliques et constitue le **théorème de Carnot**.

9. Le vocabulaire concernant les machines souffre d'une certaine confusion. Le rendement peut signifier deux choses différentes, et n'est pas utilisé dans le même sens dans le monde Anglo-Saxon et en France.

L'efficacité maximale d'une machine thermique, obtenu pour un fonctionnement réversible (au sens thermodynamique), ne dépend ni de la machine ni du fluide caloporteur, mais uniquement des températures des sources chaude et froide.

Considérons une centrale nucléaire, fonctionnant entre deux sources de températures $T_C = 300^\circ\text{C}$ et $T_F = 20^\circ\text{C}$. Elle fournit à l'alternateur une puissance de 1300 MW, et son rendement ne vaut que 55% du rendement théorique maximal. On veut déterminer les puissances thermiques échangées avec chacune des deux sources.

L'efficacité maximale théorique est : $e_{\max} = 1 - T_F/T_C = 1 - 293/573 = 0,49$. L'efficacité réelle est donc : $e = 0,55 e_{\max} = 0,27$. La puissance fournie à l'alternateur correspond à la puissance utile, soit $-\mathcal{P}_W$. De l'efficacité d'une machine motrice, on peut déduire la puissance reçue par le fluide caloporteur au contact de la source chaude :

$$e = \frac{-\mathcal{P}_W}{\mathcal{P}_{Q2}} \Rightarrow \mathcal{P}_{Q2} = \frac{-\mathcal{P}_W}{e} = 4840 \text{ MW}$$

Enfin, l'application du premier principe au fluide caloporteur sur un nombre entier de cycles de fonctionnement donne la puissance thermique cédée à la source froide :

$$\mathcal{P}_W + \mathcal{P}_{Q1} + \mathcal{P}_{Q2} = 0 \Rightarrow -\mathcal{P}_{Q1} = \mathcal{P}_W + \mathcal{P}_{Q2} = -1300 + 4840 = 3540 \text{ MW}$$

En définitive, l'utilisateur dépense 4840 MW pour alimenter la centrale, et récupère une puissance utile de 1300 MW ; le reste, soit 3540 MW est rejeté dans l'environnement.

3 Cycles dithermes inverses ou récepteurs

3.1 Position du problème

On constate expérimentalement que le transfert thermique se fait spontanément des zones de température grande vers des zones de température plus faible. Dans le cas de deux sources, le transfert thermique spontané se fait de la source chaude vers la source froide. Or, il existe des situations où il est intéressant de réaliser le transfert thermique dans l'autre sens. C'est le cas des machines frigorifiques (réfrigérateur, congélateur, climatiser), et des pompes à chaleur.

Une machine frigorifique a pour but de maintenir une enceinte à une température inférieure à celle de l'environnement. Or, du fait de la différence de température, il y a constamment de l'énergie thermique qui rentre dans la chambre froide par conduction à travers les parois, ou chaque fois qu'on ouvre la porte. Il faut donc en permanence extraire de l'énergie de la zone froide et la rejeter dans l'environnement.

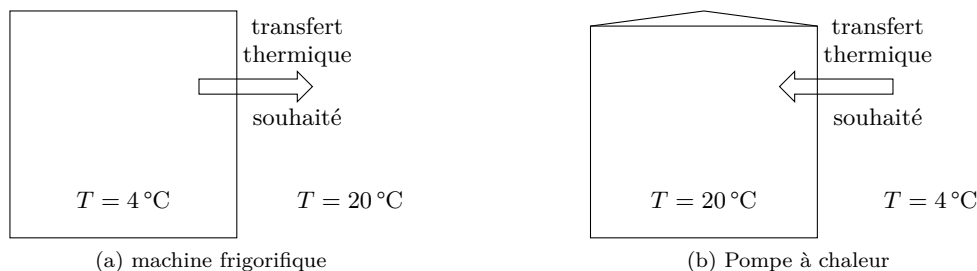


FIGURE 8 – But des machines frigorifiques et des pompes à chaleur.

Une pompe à chaleur a pour objectif de maintenir une enceinte à une température supérieure à celle de son environnement. Comme dans le cas de la machine frigorifique, il y a en permanence des sorties d'énergie

thermique à travers les parois et les fenêtres par conduction thermique, qui tend à faire diminuer la température du local. Le but d'une pompe à chaleur est de prélever de l'énergie dans milieu extérieur plus froid pour la transférer au local plus chaud.

On appelle **machine thermique réceptrice** ou **récepteur** une machine dans laquelle le fluide caloporteur reçoit réellement un travail, et effectue un transfert thermique dans le sens non spontané : de la source froide vers la source chaude.

3.2 Échanges énergétiques dans un récepteur

3.2.1 Sens des échanges

L'impossibilité d'un simple transfert thermique d'une zone froide vers une zone chaude est un énoncé du second principe de la thermodynamique. Un tel transfert n'est possible que s'il s'accompagne d'un autre transfert d'énergie, la plupart du temps un travail, qui doit être d'une façon ou d'une autre fourni par l'opérateur.

On peut réaliser un transfert thermique d'une source froide vers une source chaude grâce à une machine cyclique ditherme, dont le fluide caloporteur (dit aussi **fluide frigorigène** dans le cas des machines frigorifiques) transfère l'énergie thermique de la source froide vers la source chaude, en recevant du travail de l'opérateur. Les échanges énergétiques sont alors exactement opposés à ceux d'un cycle moteur.

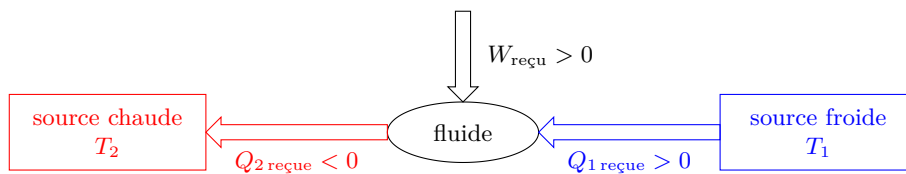


FIGURE 9 – Échanges d'énergie dans un cycle ditherme récepteur.

Le cycle est valable pour une machine frigorifique comme pour une pompe à chaleur, mais le point de vue est différent. Dans une machine frigorifique, l'objectif est de maximiser l'énergie thermique extraite de la source froide, soit $Q_{1\text{reçu}}$, alors que dans le cas de la pompe à chaleur, il est de maximiser l'énergie fournie à la source chaude, soit $-Q_{2\text{reçu}}$.

3.2.2 Réalisation pratique

Dans une machine frigorifique, le fluide est un liquide facile à vaporiser (actuellement des halogénoalcanes), c'est-à-dire dont la chaleur latente de vaporisation est faible.

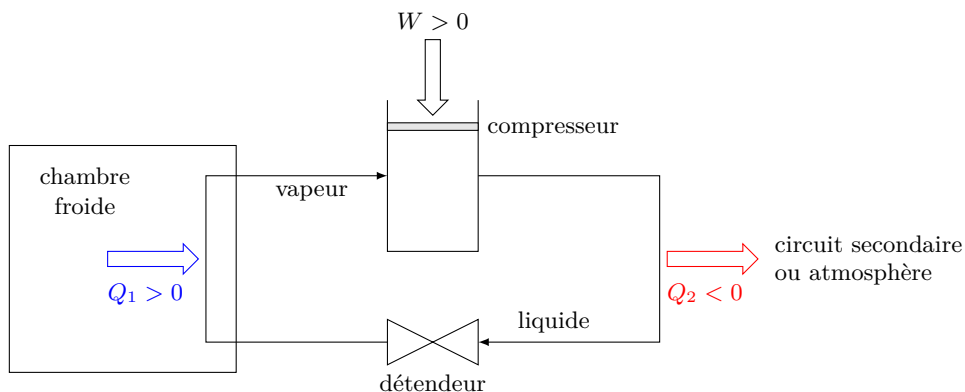


FIGURE 10 – Principe de réalisation d'une machine frigorifique.

À l'entrée de la chambre frigorifique, le liquide passe dans un détendeur qui abaisse sa pression en-dessous de sa pression de vapeur saturante à la température de la chambre froide, ce qui entraîne la vaporisation du liquide. Or la vaporisation nécessite de l'énergie, il y a donc un transfert thermique de la chambre frigorifique vers le fluide, d'où un abaissement de température de la chambre froide.

À la sortie de la chambre froide, le fluide est gazeux. Il est liquéfié à l'aide d'un compresseur, au niveau duquel l'opérateur fournit un travail. La liquéfaction libérant de l'énergie, il y a un transfert thermique du fluide vers l'atmosphère extérieure, qui constitue la source chaude.

Le principe d'une pompe à chaleur est exactement le même que celui de la machine frigorifique, mais la partie intéressante pour l'utilisateur est la source chaude et non plus la source froide.

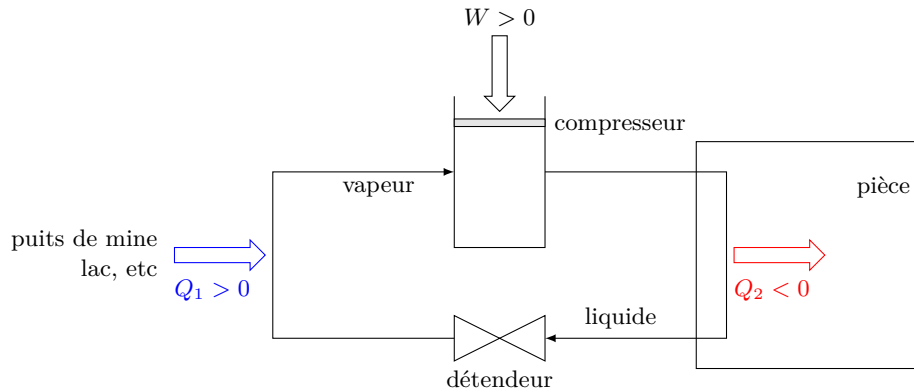


FIGURE 11 – Principe de réalisation d'une pompe à chaleur.

Des pompes à chaleur fonctionnant avec le sous-sol comme source froide peuvent être installées comme chauffage d'appoint pour des habitations individuelles. Dans ce cas, le fluide (généralement de l'eau) doit circuler dans de long tuyaux enfouis à profondeur modérée¹⁰. Les pompes à chaleur modernes utilisent l'atmosphère comme source froide.

Une machine réceptrice, réfrigérateur ou pompe à chaleur, ne peut donc fonctionner qu'avec un fluide frigorigène adapté aux températures des sources :

- il doit pouvoir se vaporiser à la température de la source froide sous une pression pas trop éloignée de la pression atmosphérique,
- il doit pouvoir se liquéfier à la température de la source chaude sous une pression pas trop éloignée de la pression atmosphérique,

La condition sur la pression est importante pour pouvoir réaliser des machines ne nécessitant pas de gérer des pressions trop élevées ou trop basses, ce qui entraîne des contraintes techniques. Par ailleurs, il est préférable que l'enthalpie de vaporisation soit la plus élevée possible pour qu'on puisse échanger le plus possible d'énergie avec le moins possible de fluide. Plus cette enthalpie de changement d'état est faible, plus il faut faire circuler de fluide par unité de temps pour parvenir au même résultat.

3.3 Efficacité d'une machine frigorifique

3.3.1 Définition

Dans une machine frigorifique, l'opérateur fournit un travail au niveau du compresseur, et il souhaite extraire de l'énergie thermique au niveau de la source froide. L'**efficacité énergétique** de la machine frigorifique le rapport entre l'énergie utile récupérée et l'énergie coûteuse, c'est-à-dire l'énergie que l'utilisateur doit dépenser, soit :

$$e = \frac{Q_{1 \text{ reçue}}}{W_{\text{reçu au niveau du compresseur}}} \quad (7)$$

10. Cela nécessite d'avoir un terrain assez grand. À noter que, du fait de la présence du compresseur, la pompe à chaleur est un dispositif bruyant, et est une cause de conflit classique avec les voisins.

Notons que, dans la réalité, le fluide reçoit du travail à d'autre endroit de son cycle, en particulier lorsqu'il change d'état : son volume varie alors fortement, ce qui implique un travail des forces pressantes. Dans la suite du calcul, on néglige le travail reçu par le fluide ailleurs qu'au niveau du compresseur, autrement dit, on suppose que le travail reçu au niveau du compresseur est assimilable au travail total reçu au cours du cycle.

Le premier principe sur un nombre entier de cycles de fonctionnement permet alors d'exprimer en fonction des transferts thermiques : $\Delta U = 0 = W_{\text{reçu}} + Q_{1\text{reçu}} + Q_{2\text{reçu}}$ soit $W_{\text{reçu}} = -Q_{1\text{reçu}} - Q_{2\text{reçu}}$. L'efficacité énergétique peut alors s'exprimer uniquement en fonction des échanges thermiques :

$$e = \frac{Q_{1\text{reçu}}}{-Q_{1\text{reçu}} - Q_{2\text{reçu}}} = \frac{1}{-1 - Q_{2\text{reçu}}/Q_{1\text{reçu}}}$$

L'efficacité d'un réfrigérateur commercial annoncée par le fabricant est généralement entre $e = 2$ et 4 . La performance réelle est moindre en pratique du fait de son utilisation normale : ouverture des portes, formation de givre, introduction d'aliments insuffisamment refroidis, etc. Dans les machines frigorifiques performantes modernes, une partie de l'énergie libérée au niveau de la source chaude est récupérée et réinjectée au niveau du compresseur, ce qui augmente l'efficacité. L'efficacité est le critère d'attribution des lettres à destination des acheteurs (tableau 12).

Comme pour le moteur, on peut raisonner sur les puissances, ce qui conduit à une expression analogue de l'efficacité :

$$e = \frac{P_{Q_{1\text{reçu}}}}{P_{W_{\text{reçu}}}} = \frac{1}{-1 - P_{Q_{2\text{reçu}}}/P_{Q_{1\text{reçu}}}}$$

3.3.2 Efficacité maximale d'une machine frigorifique

Comme dans le cas des machines motrices, l'inégalité de Clausius impose une contrainte sur les transferts thermiques. Comme $Q_{1\text{reçu}} > 0$, on a :

$$\begin{aligned} \frac{Q_{1\text{reçu}}}{T_1} + \frac{Q_{2\text{reçu}}}{T_2} \leq 0 &\Rightarrow -\frac{Q_{2\text{reçu}}}{T_2} \geq \frac{Q_{1\text{reçu}}}{T_1} \Rightarrow -\frac{Q_{2\text{reçu}}}{Q_{1\text{reçu}}} \geq \frac{T_2}{T_1} \\ &\Rightarrow -1 - \frac{Q_{2\text{reçu}}}{Q_{1\text{reçu}}} \geq -1 + \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{1}{-1 - Q_{2\text{reçu}}/Q_{1\text{reçu}}} \leq \frac{1}{-1 + T_2/T_1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \end{aligned}$$

En définitive, l'efficacité d'une machine frigorifique fonctionnant entre une source froide de température T_1 et une source chaude de température T_2 est toujours inférieure à une valeur maximale telle que :

$$e \leq e_{\text{max}} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (8)$$

L'efficacité maximale correspond au cas où l'égalité de Clausius est vérifiée, autrement dit au fonctionnement réversible de la machine frigorifique. On retrouve le théorème de Carnot : l'efficacité maximale de la machine ne dépend que des températures des sources et non des détails techniques de la machine (nature du fluide frigorigène, dimensionnement des tuyaux, débit etc).

Évaluons la valeur typique de l'efficacité maximale d'une machine frigorifique. La chambre froide est maintenue à la température de l'ordre de $T_1 = -10^\circ\text{C}$, et la source chaude est l'atmosphère dont la température l'été peut être de $T_2 = 30^\circ\text{C}$. L'application de la formule donne une efficacité maximale théorique $e_{\text{max}} = 263/40 = 6,6$. On constate que l'efficacité réelle est de l'ordre de deux fois moins.

3.3.3 Exemple d'un congélateur commercial

La fiche technique d'un congélateur indique une consommation de $0,67 \text{ kW} \cdot \text{h}$ pendant 24 h et un pouvoir de congélation de $22 \text{ kg}/24 \text{ h}$, pour un fonctionnement dans un local à 20°C et une température de consigne de -18°C . On veut estimer l'efficacité de ce congélateur.

On donne les caractéristiques thermodynamiques typiques des aliments :

- Capacité thermique massique moyenne des aliments décongelés : $c_d = 3,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,
- Capacité thermique massique moyenne des aliments congelés : $c_c = 1,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,
- Enthalpie massique moyenne de fusion des aliments : $\ell_{\text{fus}} = 250 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Raisonnons sur une durée de 24 h. La consommation correspond au travail électrique fourni par l'utilisateur à la machine, donc à l'énergie coûteuse, soit : $W_{\text{reçu}} = 0,67 \text{ kW} \cdot \text{h} = 0,67 \cdot 10^3 \times 3600 = 2,4 \cdot 10^6 \text{ J} = 2,4 \text{ MJ}$.

Cette énergie dépensée par l'utilisateur permet d'extraire une énergie thermique $Q_{1 \text{ reçue}}$ de la chambre froide, qu'il faut évaluer. Cette énergie correspond à celle libérée par les 22 kg d'aliments initialement à $T_2 = 20^\circ\text{C}$ qu'on place à l'intérieur de la chambre froide et qui sont congelés à $T_1 = -18^\circ\text{C}$ au bout de 24 h. Autrement dit : $Q_{1 \text{ reçue par le fluide}} = Q_{\text{libérée par les aliments}} = -Q_{\text{reçue par les aliments}}$.

Considérons les aliments. Il s'agit d'un système qu'on peut considérer à pression constante à partir du moment où ils sont placés dans le congélateur. L'application du bilan enthalpique permet alors d'écrire : $Q_{\text{reçue par les aliments}} = \Delta H$, où ΔH est la variation d'enthalpie des aliments au cours du processus.

L'enthalpie étant une fonction d'état, on peut calculer sa variation sur une transformation fictive menant du même état initial au même état final. La transformation peut être décomposée en trois phases.

- La première est le refroidissement de la masse $m = 22 \text{ kg}$ d'aliments décongelés de la température initiale T_2 à la température de fusion T_{fus} qu'on peut supposer proche de la température de fusion de l'eau : $\Delta H_1 = m c_d (T_{\text{fus}} - T_2)$.
- La seconde étape est le changement d'état à température constante, qui est l'opposé d'une fusion, donc pour lequel : $\Delta H_2 = -m \ell_f$.
- Enfin la troisième étape est le refroidissement des aliments congelés jusqu'à la température finale T_1 , soit : $\Delta H_3 = m c_c (T_1 - T_{\text{fus}})$.

Par additivité de la fonction enthalpie, on en déduit :

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 = m \times [c_d (T_{\text{fus}} - T_2) - \ell_f + c_c (T_1 - T_{\text{fus}})] = -7680 \text{ kJ} = -7,68 \text{ MJ}$$

Par conséquent $Q_{1 \text{ reçue par le fluide}} = 7,68 \text{ MJ}$, et l'efficacité de ce congélateur est : $e = Q_{1 \text{ reçue}}/W_{\text{reçu}} = 7,68/2,4 = 3,2$.

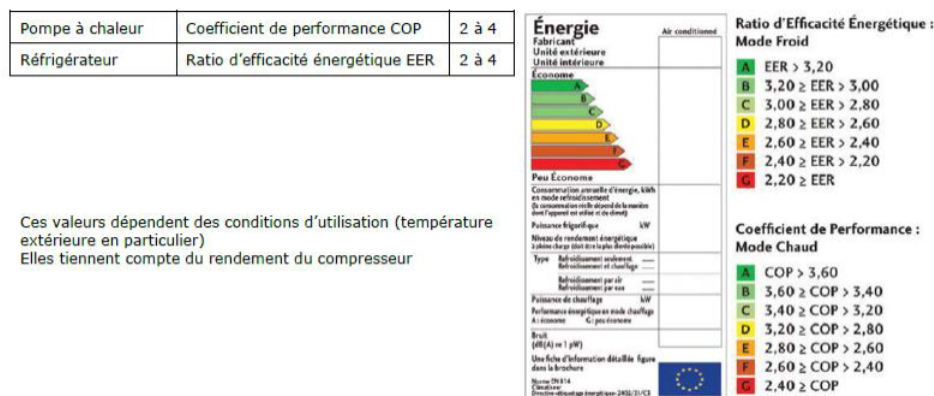


FIGURE 12 – Performances des machines réceptrices.

3.4 Efficacité d'une pompe à chaleur

3.4.1 Définition

Dans une pompe à chaleur, l'opérateur fournit un travail au niveau du compresseur, et il souhaite libérer de l'énergie thermique au niveau de la source chaude. L'**efficacité** de la pompe à chaleur, appelée aussi le **coefficient de performance** (COP), est le rapport entre l'énergie utile récupérée et l'énergie coûteuse, c'est-à-dire l'énergie que l'utilisateur doit dépenser, soit :

$$e = \frac{-Q_{2\text{ reçue}}}{W_{\text{reçu au niveau du compresseur}}} \quad (9)$$

Le premier principe sur un nombre entier de cycles de fonctionnement permet alors d'exprimer en fonction des transferts thermiques : $\Delta U = 0 = W_{\text{reçu}} + Q_{1\text{ reçue}} + Q_{2\text{ reçue}}$ soit $W_{\text{reçu}} = -Q_{1\text{ reçue}} - Q_{2\text{ reçue}}$, en supposant, comme pour la machine frigorifique, que le travail reçu par le gaz se limite à celui reçu au niveau du compresseur. À nouveau, l'efficacité énergétique peut alors s'exprimer uniquement en fonction des échanges thermiques :

$$e = \frac{-Q_{2\text{ reçue}}}{-Q_{1\text{ reçue}} - Q_{2\text{ reçue}}} = \frac{1}{1 + Q_{1\text{ reçue}}/Q_{2\text{ reçue}}}$$

Le coefficient de performance des pompes à chaleur commerciales est de l'ordre de $\text{COP} = 1,5$ à 4. C'est aussi le critère d'attribution des lettres à destination des acheteurs (tableau 12).

Comme pour les autres machines, on peut raisonner sur les puissances, ce qui conduit à une expression analogue de l'efficacité :

$$e = \frac{-\mathcal{P}_{Q_{2\text{ reçue}}}}{\mathcal{P}_{W_{\text{reçu}}}} = \frac{1}{1 + \mathcal{P}_{Q_{1\text{ reçue}}}/\mathcal{P}_{Q_{2\text{ reçue}}}}$$

3.4.2 Efficacité maximale d'une pompe à chaleur

L'inégalité de Clausius permet encore de montrer que l'efficacité d'une pompe à chaleur admet une valeur maximale. En effet, et en se rappelant que $Q_{2\text{ reçue}} < 0$:

$$\begin{aligned} \frac{Q_{1\text{ reçue}}}{T_1} + \frac{Q_{2\text{ reçue}}}{T_2} \leq 0 &\Rightarrow \frac{Q_{1\text{ reçue}}}{T_1} \leq -\frac{Q_{2\text{ reçue}}}{T_2} \Rightarrow \frac{Q_{1\text{ reçue}}}{Q_{2\text{ reçue}}} \geq -\frac{T_1}{T_2} \\ &\Rightarrow 1 + \frac{Q_{1\text{ reçue}}}{Q_{2\text{ reçue}}} \geq 1 - \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{1}{1 + Q_{1\text{ reçue}}/Q_{2\text{ reçue}}} \leq \frac{1}{1 - T_1/T_2} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \end{aligned}$$

En définitive, l'efficacité d'une pompe à chaleur fonctionnant entre une source froide de température T_1 et une source chaude de température T_2 est toujours inférieure à une valeur maximale telle que :

$$e \leq e_{\text{max}} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad (10)$$

L'efficacité maximale correspond au cas où l'égalité de Clausius est vérifiée, autrement dit au fonctionnement réversible de la machine, et on retrouve le théorème de Carnot : l'efficacité maximale de la machine ne dépend que des températures des sources.

Une des plus anciennes pompe à chaleur installée a permis le chauffage de l'Hôtel de ville de Zürich ; la source froide est le lac de Zürich. On souhaite une température intérieur de 19°C , un jour où l'eau du lac est à 8°C . L'efficacité maximale est alors $292/(19 - 8) = 26,5$. Cette valeur est énorme est n'est jamais ne serait-ce qu'approchée par une pompe à chaleur réelle.

3.4.3 Avantage d'une pompe à chaleur par rapport à un chauffage classique

Un chauffage thermique classique consiste à chauffer un local en extrayant de l'énergie de la matière organique (bois, gaz, pétrole, etc) par combustion. L'énergie récupérée correspond à l'énergie disponible dans le combustible, soit une efficacité d'au plus 1, en fait souvent moins si la combustion est incomplète.

Un radiateur électrique consiste à faire circuler un courant électrique dans une résistance. Par effet Joule, le travail électrique fourni est converti intégralement en énergie thermique, ce qui fait à nouveau une efficacité de 1.

On constate donc que la pompe à chaleur est meilleure en terme d'efficacité, puisqu'elle permet d'injecter dans le local à chauffer une quantité d'énergie thermique supérieure au travail fourni par l'utilisateur. Le complément est extrait de la source froide, qui est une source gratuite d'énergie (atmosphère, terre, lac, etc). Le coût d'un chauffage par une pompe à chaleur est donc moindre que n'importe quel chauffage classique, mais le coût d'installation est en revanche nettement supérieur.

4 Cogénération

4.1 Définition et exemples

On a vu que, dans les machines motrices, le rendement est nécessairement inférieur à 1, puisque l'inégalité de Clausius impose que $e \leq 1 - T_1/T_2$. Une partie de l'énergie fournie par la source chaude, c'est-à-dire par l'utilisateur, est perdue par dissipation thermique dans la source froide. Il est souhaitable d'essayer de valoriser ce transfert thermique.

Notons qu'il n'y a pas que les moteurs qui sont concernés. Dans les réfrigérateurs modernes, l'énergie dissipée dans la source chaude est en partie récupérée pour alimenter le compresseur. D'autres dispositifs que les machines cycliques dithermes peuvent aussi inclure de tels dispositifs : les sèche-linges extraient l'eau du linge par évaporation, et il est possible de récupérer (pour alimenter le moteur) une partie de l'énergie dépensée en recondensant la vapeur d'eau.

La **cogénération** consiste à combiner deux modes de production d'énergie utile dans une même centrale. On parle de **cogénération électrique** lorsqu'on produit de l'électricité de deux façons différentes grâce à deux cycles juxtaposés (centrale à cycles combinés) :

- une turbine à combustion, qui éjecte des gaz brûlés en mettant une turbine en rotation ,
- une turbine à vapeur dont la source chaude est constituée par les gaz d'éjection de la turbine à combustion (au lieu d'un circuit primaire lui-même chauffé par les réactions de fission dans une réaction nucléaire).

Le dispositif comporte donc deux turbines qui produisent un travail électrique.

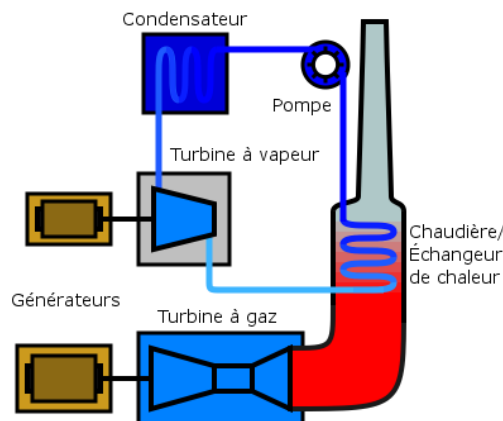


FIGURE 13 – Principe d'une centrale électrique à cycle combinés.

Schéma : Alexandre Delode, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:COGAS-diagramFR.png>

La **cogénération thermique** consiste à produire du travail (le plus souvent électrique), et d'utiliser comme source froide le fluide d'un réseau de chauffage. L'ensemble peut se décliner à des échelles très différentes :

- à grande échelle, une centrale alimente en électricité une zone industrielle et en énergie thermique des serres agricoles ;
- à petite échelle : un groupe électrogène alimente une maison en électricité et en énergie thermique.

La cogénération thermique est une idée séduisante, mais qui pose des problèmes de mise en œuvre, du fait de deux types de contraintes très fortes. La première est une contrainte de proximité : l'utilisation de l'énergie thermique doit se faire proche du lieu de la centrale. En effet, l'énergie thermique se transporte beaucoup moins bien que l'électricité, car les pertes par conduction dans le réseau sont très importantes. Cela implique qu'il soit pertinent de construire la centrale là où on a besoin d'un réseau de chauffage¹¹, ou au contraire qu'on incite des utilisateurs de réseau de chauffage à s'installer près des centrales. Il y a d'autre part une contrainte de régularité : toute centrale doit subir des périodes de mise à l'arrêt de la centrale pour son entretien, ce qui interrompt l'alimentation du réseau de chauffage. Les périodes d'arrêt de la centrale doivent donc être soigneusement planifiées en concertation avec les utilisateurs d'énergie thermique.

4.2 Efficacité de la cogénération

4.2.1 Cas de la cogénération électrique

L'efficacité globale d'un dispositif de cogénération est le rapport de la somme de toutes les énergies utiles récupérées à l'énergie coûteuse.

L'efficacité globale d'un dispositif de cogénération est le rapport de la somme de toutes les énergies utiles récupérées à l'énergie coûteuse.

Dans le cas de la cogénération électrique, il y a deux termes d'énergie utile, qui correspondent au travail électrique fourni par chacune des deux turbines. En conséquence, l'efficacité est de la forme :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec } 1} + \mathcal{P}_{\text{élec } 2}}{\mathcal{P}_{\text{combustion}}}$$

Comme il s'agit de deux moteurs, cette efficacité est nécessairement inférieure à 1, et peut être qualifiée de rendement. En effet, pour la seconde turbine (échanges énergétiques W' , Q'_1 et Q'_2 reçue par le fluide), l'énergie utile est $-W'$ telle que $-W' < Q'_2$ puisque c'est un moteur. Or la source chaude de la seconde turbine est la source froide de la première turbine (échanges énergétiques W , Q_1 et Q_2 reçue par le fluide). L'énergie thermique Q'_2 est donc nécessairement inférieure à l'énergie thermique $-Q_1$ libérée par la première turbine. Par ailleurs, le premier principe appliqué à la première turbine donne : $-W = Q_1 + Q_2$, on obtient :

$$-W - W' < Q_1 + Q_2 - Q_1 \Rightarrow -W - W' < Q_2 \Rightarrow \frac{-W - W'}{Q_2} < 1$$

Une centrale électrique à gaz a un rendement typique de l'ordre de 35%. Si on la combine avec une centrale à vapeur, le rendement du cycle combiné peut atteindre 60%, ce qui est une amélioration tout-à-fait considérable.

4.2.2 Cas de la cogénération thermique

Dans le cas de la cogénération thermique, les deux formes d'énergie utiles sont d'une part le travail électrique récupéré, et d'autre part l'énergie thermique récupérée, soit une efficacité :

$$e = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}} + \mathcal{P}_{\text{therm utile}}}{\mathcal{P}_{\text{combustion}}}$$

À nouveau, cette efficacité peut être appelée rendement, car elle est nécessairement inférieure à 1. En effet, si on imagine qu'on arrive à utiliser la totalité de l'énergie thermique rejetée dans la source froide, alors l'énergie utile est la somme $-W - Q_1$. Or, par application du premier principe au fluide caloporteur, $-W - Q_1 = Q_2$, qui est précisément l'énergie coûteuse. L'efficacité serait alors $(-W - Q_1)/Q_2 = 1$.

11. Pour un réseau de chauffage urbain, cela implique d'installer la centrale de production d'électricité en bordure immédiate de la zone urbaine.

En réalité, l'énergie rejetée dans la source froide inclut tous les échanges vers le milieu extérieur, et en particulier toutes les pertes vers l'atmosphère au niveau des tuyaux du dispositif (ceux du moteur et ceux du circuit de chauffage). En conséquence, on ne récupère en pratique qu'une fraction de l'énergie thermique rejetée par la machine dans la source froide, soit une énergie thermique utile $Q_{\text{utile}} < -Q_1$. En conséquence, l'efficacité est toujours strictement inférieure à 1.

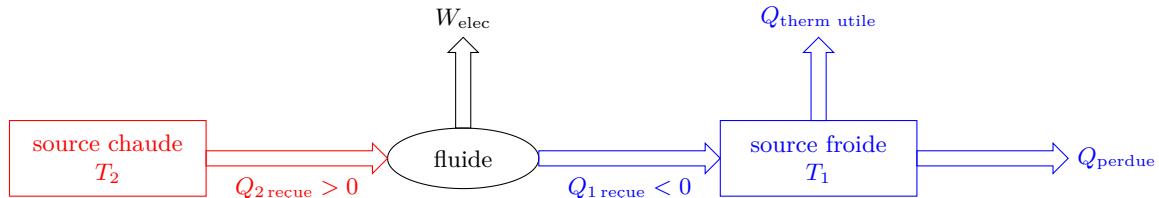


FIGURE 14 – Bilan énergétique de la cogénération thermique.

Considérons une turbine à gaz munie d'une chaudière de récupération, qui permet de produire 33 MJ électrique et 50 MJ thermique à partir d'un combustible libérant 100 MJ. Pour cette centrale combinée :

- le rendement électrique est de $33/100 = 33\%$,
- le rendement thermique est de $50/100 = 50\%$,
- le rendement global est de $(50 + 33)/100 = 83\%$.

Il est intéressant de noter que cette centrale combinée a un rendement global meilleur que la juxtaposition d'une turbine à gaz simple et d'une chaudière à gaz simple, bien que son rendement électrique soit moins bon que celui d'une turbine à gaz (environ 40%) et que son rendement thermique soit moins bon que celui d'une chaudière à gaz simple (environ 90%).

En effet, pour produire 33 MJ électrique, la turbine à gaz simple consomme $33/0,4 = 82,5$ MJ de combustible, et pour produire 50 MJ thermique, la chaudière à gaz simple consomme $50/0,9 = 55,5$ MJ de combustible. La juxtaposition des deux appareils indépendants consomme donc globalement $55,5 + 82,5 = 138$ MJ, soit un rendement global de $(50 + 33)/138 = 60\%$, inférieur à celui de la centrale combinée.

L'économie de combustible réalisée par le dispositif de cogénération est de 38 MJ soit $38/138 = 27,5\%$, ce qui est tout-à-fait intéressant.