

Machines thermiques

notes pour une leçon d'agrégation

29 avril 2021

Préambule

L'étude de cette leçon nécessite au préalable d'être familier avec le premier et le deuxième principe de la thermodynamique, pour des systèmes fermés et ouverts, la modélisation des échanges d'énergie, ainsi que le modèle du gaz parfait.

Table des matières

1 Etude théorique des machines thermiques	1
2 Le moteur thermique	4
3 Le réfrigérateur	8
4 Conclusion	10

1 Etude théorique des machines thermiques

On commence par poser la problématique à laquelle peut répondre la machine thermique à construire, en raisonnant en termes de travail reçu/fourni, chaleur reçue/fournie, par rapport aux sources chaudes et froides auxquelles elle est raccordée. Par exemple, un moteur est un système qui prélève de la chaleur à l'extérieur, et qui fournit un travail à l'extérieur. En convention récepteur, la chaleur est donc dans ce cas comptée positivement et le travail

négativement. Un réfrigérateur prélève un travail mécanique à l'extérieur et prélève de la chaleur dans les bacs à aliments.

De plus, une machine thermique va adopter un fonctionnement *cyclique*. L'énergie interne U et l'entropie S étant des fonctions d'état, sur une transformation cyclique, puisque celle-ci revient au même état à chaque fois, leur variation totale sera nulle : $\Delta_{\text{cycle}}U = \Delta_{\text{cycle}}S = 0$.

Ce qui conduit aux relations suivantes si on applique les deux premiers principes :

$$\Delta_{\text{cycle}}U = 0 \Leftrightarrow Q_{\text{cycle}} = -W_{\text{cycle}}$$

$$\Delta_{\text{cycle}}S = 0 \Leftrightarrow \int_{\text{cycle}} \frac{\delta Q}{T} + S_{\text{cycle}}^{\text{créée}} = 0 \text{ sachant que } S_{\text{cycle}}^{\text{créée}} \geq 0$$

Commençons par discuter des machines monothermes, c'est-à-dire celles ne fonctionnant qu'avec une seule source de chaleur.

Les machines monothermes. Une machine monotherme réalise au cours de son cycle, un échange de chaleur Q et de travail W . Le premier principe pour une transformation cyclique est tel que $Q + W = 0$ et on a donc $W = -Q$. Le deuxième principe indique : $\Delta S = 0 = \frac{Q}{T_{\text{source}}} + S_{\text{cycle}}^{\text{créée}} \Leftrightarrow \frac{Q}{T_{\text{source}}} \leq 0$. Dans ces conditions, la seule machine monotherme possible est une machine qui recevrait un travail de l'extérieur et qui lui retransmettrait de l'énergie thermique. Un radiateur électrique est un exemple d'une telle machine. Par contre, on vient de montrer qu'à cause du deuxième principe, *il est impossible de réaliser une machine monotherme qui produirait un travail, ou une machine qui pourrait absorber de l'énergie thermique de l'extérieur.*

A partir de maintenant nous allons étudier les machines *dithermes*, c'est-à-dire des machines qui peuvent échanger de l'énergie thermique avec deux sources, à deux températures différentes (thermostatées), que l'on nommera *source chaude* et *source froide*, et on regardera quelles possibilités nouvelles cela engendre par rapport aux machines monothermes.

Etude des machines dithermes. Les principes de la thermodynamique, pour des machines dithermes fonctionnant par transformations cycliques, amènent les relations suivantes :

$$\Delta_{\text{cycle}}U = W + Q_c + Q_f = 0$$

$$\Delta_{\text{cycle}}S = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_{\text{cycle}}^{\text{créée}} = 0$$

Le second principe, puisque $S^{cr  e e} \geq 0$, implique que :

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

Cette relation est *l'inégalité de Carnot-Clausius*. Elle donne une condition de réalisation d'une machine thermique fonctionnelle.

Elle sert à construire le *diagramme de Raveau*, qui permet de visualiser les transformations cycliques possibles pour une machine ditherme, c'est-à-dire celles répondant à cette inégalité.

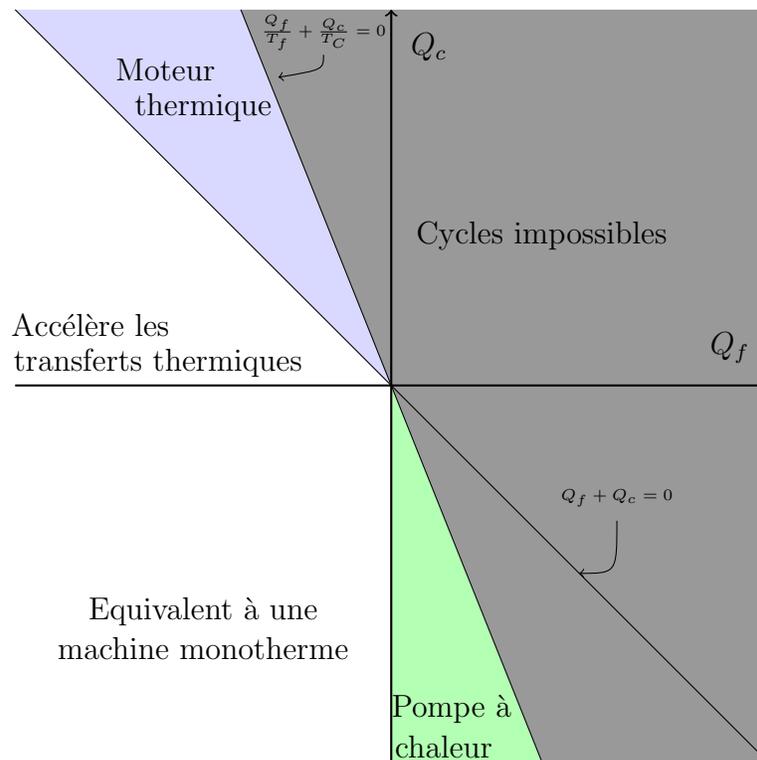


FIGURE 1 – Diagramme de Raveau.

Etude des domaines du diagramme. Pour un T_f et un T_c donn  e, on trace la ligne d'équation $\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} = 0$; les points à droite de ce diagramme correspondent à des situations ne permettant pas de mettre en œuvre une

machine thermique car ne répondant pas à l'inégalité de Clausius conséquente du deuxième principe. Les points à gauche peuvent s'organiser dans plusieurs domaines en fonction de la condition posée par le premier principe : on tracera la droite d'équation $Q_f = -Q_c$ à cet effet.

- Accélère les transferts thermiques : puisque $Q_f < 0$ et $Q_c + Q_f < 0$ on doit avoir $W > 0$; c'est une machine qui absorbe un travail et de la chaleur à la source chaude pour la céder à la source froide. Elle ne fait qu'accélérer les transferts spontanés de chaleur du chaud vers le froid. L'intérêt d'une telle machine est assez limité.
- Equivalent à une machine monotherme : $Q_f < 0$ et $Q_c < 0$ donc $W > 0$; c'est une machine qui absorbe un travail pour céder de la chaleur aux deux sources. Il n'y a pas de différence fondamentale avec une machine monotherme, et cette situation n'amène donc rien de nouveau.
- Moteur thermique : $Q_c > 0$, $Q_f < 0$ et $Q_c + Q_f > 0$ donc $W < 0$: c'est une machine qui peut produire du travail à partir d'échanges thermiques avec deux sources de chaleur. Cette situation est nouvelle par rapport aux machines monothermes et intéressante.
- Pompe à chaleur : $Q_f > 0$, $Q_c < 0$ et $Q_f + Q_c < 0$ donc $W > 0$. Cette machine absorbe un travail pour transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude, à l'inverse donc des transferts spontanés d'énergie thermique du chaud vers le froid; cette situation est également nouvelle par rapport aux machines monothermes et est aussi très intéressante.

Nous allons ainsi étudier dans la suite de la leçon des machines thermiques correspondant aux deux cas d'intérêt présentés dans le diagramme de Raveau : les moteurs thermiques et les pompes à chaleur / réfrigérateurs.

2 Le moteur thermique

Le moteur thermique est donc une machine absorbant de la chaleur à une source chaude, donnant de la chaleur à une source froide, et produisant un travail. Il existe plusieurs moyens de réaliser une telle machine. Nous allons ici étudier le cycle de Carnot et le moteur à explosion.

Généralités. Calcul du *rendement de Carnot*. Le rendement d'une machine thermique est défini comme le rapport entre l'énergie « utile » qu'elle

peut fournir à l'extérieur à chaque cycle, et l'énergie nécessaire (énergie « coûteuse ») qu'elle consomme pour réaliser chaque cycle. Ici l'énergie utile est le travail fourni à l'extérieur, et l'énergie coûteuse est la chaleur absorbée depuis la source chaude. On écrit alors :

$$\rho = \left| \frac{W}{Q_c} \right| = \frac{-W}{Q_c}$$

en convention récepteur. Le premier principe permet d'écrire :

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

puis le second principe permet d'écrire :

$$\rho = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c} - \frac{T_f S^{\text{créée}}}{Q_c}$$

Le rendement d'un moteur répond donc à l'inéquation suivante :

$$\rho \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

L'égalité n'étant réalisée que dans le cas d'un cycle de fonctionnement réversible. Le rendement maximal, obtenu à l'égalité, est le *rendement de Carnot*.

Cycle de Carnot. Le cycle de Carnot est un cycle ditherme réversible. La condition de réversibilité implique que les échanges thermiques avec les sources chaude et froide soient isothermes. Le cycle est donc, dans le cas le plus simple, le suivant :

- 1 → 2 : Une transformation isotherme à T_c ;
- 2 → 3 : Une transformation adiabatique où le gaz passe de T_c à T_f ;
- 3 → 4 : Une transformation isotherme à T_f ;
- 4 → 1 : Une transformation adiabatique où le gaz passe de T_f à T_c .

La réversibilité de ce cycle fait que, comme l'analyse précédente du rendement l'indique, une machine fonctionnant selon ce cycle a un rendement maximal.

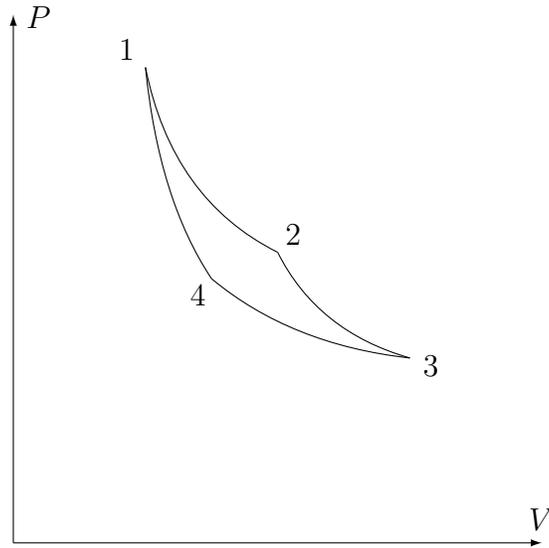


FIGURE 2 – Cycle théorique de Carnot dans le diagramme de Clapeyron.

Un moteur réel : le moteur à explosion. Il s'agit d'un moteur à essence à quatre temps, dont le fonctionnement a été théorisé par Beau de Rochas en 1862 puis mis en pratique par Otto à partir de 1867. Le cycle de fonctionnement du moteur à explosion dans le diagramme de Clapeyron est le suivant :

Les étapes du cycle sont les suivantes :

- $5 \rightarrow 1$: Admission. Le piston descend en aspirant les gaz.
- $1 \rightarrow 2$: Compression adiabatique due à la remontée du piston.
- $2 \rightarrow 3$: Allumage de la bougie : augmentation très rapide de la pression, transformation isochore.
- $3 \rightarrow 4$: Les gaz sous pression repoussent le piston : détente adiabatique.
- $4 \rightarrow 1$: Ouverture de la soupape d'échappement : la pression diminue brusquement, transformation isochore.
- $1 \rightarrow 5$: La remontée du piston évacue les gaz brûlés.

Calcul du rendement du moteur à explosion. Les échanges d'énergie thermique ont lieu aux étapes $2 \rightarrow 3$ (contact avec la source chaude) et $4 \rightarrow 1$ (contact avec la source froide) qui sont des transformations isochores. On peut donc calculer l'énergie fournie au gaz à ces étapes ; en assimilant le

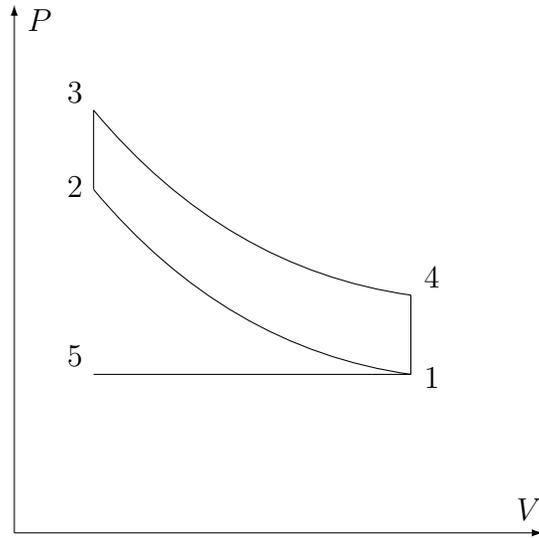


FIGURE 3 – Cycle théorique de fonctionnement du moteur de Beau de Rochas dans le diagramme de Clapeyron.

gaz à un gaz parfait :

$$Q_c = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_3 - T_2)$$

$$Q_f = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_1 - T_4)$$

Or la loi de Laplace indique que :

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

$$T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_4^{\gamma-1}$$

Pour un moteur à explosion, on peut en général accéder au taux de compression (rapport $a = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$) et les températures de la flamme et de l'air extérieur.

$$T_2 = T_1 a^{\gamma-1}$$

$$T_3 = T_4 a^{\gamma-1}$$

Ce qui conduit à écrire :

$$Q_c = -a^{\gamma-1} Q_f$$

Le travail, d'après le premier principe, est donné par

$$W = -Q_c - Q_f = -(1 - a^{1-\gamma}) Q_c$$

ce qui conduit à :

$$\rho = \frac{-W}{Q_c} = 1 - a^{1-\gamma}$$

Avec un taux de compression égal à 10 et $\gamma = 1,4$, le rendement obtenu est environ égal à 0,6. On pourra étudier le rendement au moyen d'autres formules (avec les températures) pour comparer le rendement du cycle du moteur à explosion avec celui de Carnot.

En réalité le rendement réel est bien inférieur à celui calculé. Entre la modélisation et le comportement réel d'une machine thermique, il y aura quelques divergences imputables à l'existence de phénomènes dissipatifs (frottements) par exemple.

3 Le réfrigérateur

Le réfrigérateur est une machine thermique à laquelle on fournit un travail, pour lui permettre de prélever de l'énergie thermique à une source froide et de la retransférer à une source chaude. Le fluide *caloporteur* subit les transformations suivantes :

- 1 \rightarrow 2 : Il reçoit du travail en étant comprimé de manière adiabatique dans le *compresseur*.
- 2 \rightarrow 3 : Il transmet de l'énergie thermique à la source chaude, en passant à travers le *condenseur*.
- 3 \rightarrow 4 : Sa température est baissée de manière adiabatique dans le *détendeur*.
- 4 \rightarrow 1 : Il absorbe de l'énergie thermique venant de la source froide à travers l'*évaporateur*.

Les principes thermodynamiques peuvent être appliqués au système fermé qu'est l'ensemble du fluide parcourant la totalité du circuit. Pour se restreindre à une seule partie du circuit, on doit considérer le système comme ouvert et en écoulement stationnaire. A travers un élément actif de circuit (compresseur, détendeur, etc.) on fera l'approximation que l'énergie cinétique du fluide ne varie pas puisqu'il s'écoule lentement. Le premier principe appliqué à cette partie du fluide s'écrit :

$$\Delta h = w_u + q$$

Par exemple, dans le compresseur, le fluide reçoit un travail utile massique venant des parties mobiles de l'appareil, de manière adiabatique : $\Delta h_{1 \rightarrow 2} = w_{u, \text{comp}}$

Ceci rend commode, pour l'étude des machines frigorifiques, l'utilisation du *diagramme des frigoristes* où la pression est représentée en ordonnée et l'enthalpie massique en abscisse. On trouvera un certain nombre de courbes particulières dans ce diagramme qui peuvent aider à modéliser les transformations :

- On tracera en général les courbes d'ébullition et de rosée.
- Isobares : droites horizontales.
- Isenthalpes : droites verticales.
- Isothermes : droites horizontales dans le domaine liquide + vapeur (sous la courbe de saturation); quasi-droites verticales dans le domaine liquide, courbées tendant à la verticale descendante dans le domaine gazeux.
- Isotitres : En tout point de ces courbes la fraction massique en vapeur est la même. Ces courbes n'existent que sous la courbe de saturation, elles sont vaguement verticales et convergent toutes vers le point critique.
- Isentropes : il n'y a pas de rupture de pente au passage entre les domaines liquide + vapeur et vapeur. Dans le domaine liquide, elles sont quasi-verticales.

Le cycle de fonctionnement d'une machine frigorifique dans un diagramme des frigoristes ressemble à :

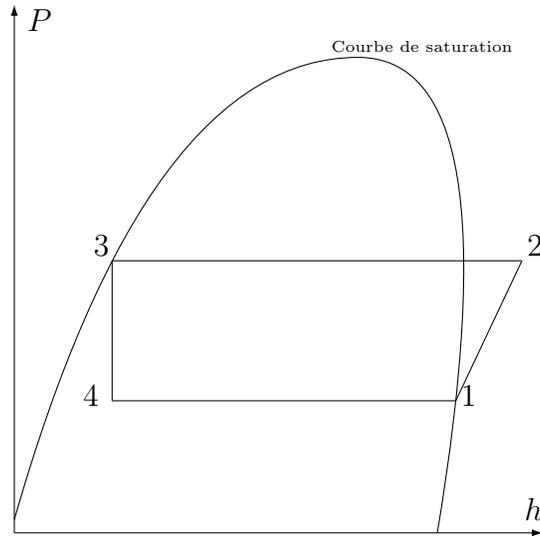


FIGURE 4 – Cycle de fonctionnement d’un réfrigérateur dans le diagramme des frigorigènes.

l’efficacité d’un réfrigérateur est la grandeur analogue au rendement du moteur thermique. Elle est définie, pour un réfrigérateur, de la manière suivante :

$$e = \frac{q_f}{w_{u,\text{comp}}}$$

l’énergie utile étant l’énergie absorbée à la source froide, et l’énergie coûteuse étant le travail fourni au fluide via le compresseur. D’après le premier principe appliqué au système ouvert, cela peut s’écrire :

$$\frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Pour une pompe à chaleur, l’énergie utile est l’énergie cédée à la source chaude : l’efficacité s’écrit alors :

$$e = \frac{-q_c}{w_{u,\text{comp}}}$$

Ce qui s’écrit avec le premier principe :

$$\frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Les efficacités calculées seront supérieures aux efficacités réelles, qui sont limités par exemple par les pertes de charge ayant lieu dans les conduites, ou la non-irréversibilité de certaines transformations.

4 Conclusion

La thermodynamique fournit des outils qui permettent de mettre en œuvre des machines thermiques qui répondent à des problématiques industrielles ou de confort. Les pompes à chaleurs, réfrigérateurs, moteurs à explosion... sont encore aujourd'hui très utilisés. Il est possible, en appliquant les principes de la thermodynamique, de prévoir leur efficacité à l'usage. Il est également possible d'imaginer des moyens d'augmenter l'efficacité théorique de celles-ci (en jouant sur les températures des sources, les propriétés de compressibilité des gaz...) Notons toutefois que d'inévitables phénomènes dissipatifs empêchent les machines d'atteindre leur rendement maximal théorique. De plus, la transition énergétique nécessitera de mettre au point des machines ayant un rendement élevé afin de consommer un minimum de ressources. Dans cette optique l'étude des machines thermiques au moyen du formalisme thermodynamique paraît indispensable.

Bibliographie

Sanz, M.-N. *et al.*(2020). Physique PCSI Tout-en-un. 5^{ème} édition. Dunod, collection J'intègre.