

CHAPITRE 22

Machines thermiques

Lors de la première révolution industrielle, au 19^e siècle, les calèches ont été partiellement remplacées par les locomotives, les péniches tractées par des chevaux ont fait place à des bateaux à vapeur, les usines se sont automatisées grâce à des machines. C'est ce qui a motivé les physiciens à développer la thermodynamique. Comprendre le fonctionnement des machines thermiques a contribué à améliorer leur rendement et permis de mieux assurer la sécurité des utilisateurs.

Au 20^e siècle, ce sont les automobiles qui envahissent le paysage. Les centrales thermiques produisent de l'électricité, les réfrigérateurs permettent de stocker des aliments ou des médicaments, les pompes à chaleur permettent de réchauffer l'intérieur en hiver et de le refroidir en été, etc.

Ce chapitre vise à expliquer dans les grandes lignes, en s'appuyant sur les lois de la thermodynamique, le fonctionnement des principaux types de machines thermiques : **moteurs thermiques**, **machines frigorifiques** et **pompes à chaleur** en particulier.

1 Description générale d'une machine thermique

1.1 Transformations cycliques du fluide caloporteur

Le but d'une machine thermique peut être de produire du mouvement, ou d'inverser en apparence le sens usuel des transferts thermiques pour réchauffer un milieu chaud ou refroidir un milieu froid.

Le point commun des machines thermiques que nous étudierons est qu'un fluide (liquide ou gaz) est utilisé pour transporter l'énergie d'un point à un autre. Ainsi, le système thermodynamique étudié n'est pas la machine thermique en soi, mais le **fluide caloporteur** qui y circule.

Dans de nombreuses machines thermiques, le fluide circule en circuit fermé. Après avoir fait un tour complet dans la tuyauterie, il revient à son point de départ, ce qui boucle un **cycle** de fonctionnement. Ainsi, après la phase d'allumage, si on attend suffisamment pour atteindre un régime stationnaire, on peut considérer que le fluide caloporteur subit un ensemble de **transformations cycliques** : son état initial est identique à son état final, au sens où toutes les variables d'état reprennent la même valeur à l'issue d'un cycle en régime stationnaire.

L'**énergie interne**, l'**enthalpie** et l'**entropie** sont des **fonctions d'état** : leur variation ne dépend que de l'état initial et de l'état final, indépendamment de la nature de la transformation et du chemin suivi. Ainsi, si on raisonne sur un cycle de fonctionnement, on peut écrire pour le fluide caloporteur :

$$\Delta U_{\text{cycle}} = 0,$$

$$\Delta H_{\text{cycle}} = 0,$$

$$\Delta S_{\text{cycle}} = 0.$$

1.2 Échanges d'énergie avec l'environnement

1.2.1 Travail reçu

Au cours d'un cycle, le fluide caloporteur fournit du travail à des pièces mécaniques ($W < 0$, moteur thermique), ou reçoit du travail ($W > 0$, récepteur thermique) de la part de ces dernières, qui sont alors souvent alimentées électriquement. Dans le bilan d'énergie au cours d'un cycle, on prend en compte la somme algébrique des travaux reçus par le fluide au cours de celui-ci.

1.2.2 Transfert thermique reçu

Au cours d'un cycle, le fluide caloporteur se retrouve successivement au contact de plusieurs sources de chaleur, que nous modéliserons par des **thermostats**, à des températures T_1, T_2 , etc., ce qui s'accompagne de transferts thermiques Q_1, Q_2 , etc.

1.2.3 Inégalité de Clausius et conséquences pratiques

Au cours d'un cycle de fonctionnement d'une machine thermique, comme l'entropie est une fonction d'état, le deuxième principe conduit à l'**inégalité de Clausius** :

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0.$$

Le cas d'égalité correspond aux transformations **réversibles**, ce qui peut être une approximation faite pour étudier théoriquement la machine, mais est impossible à satisfaire en réalité.

Exercice d'application 1 :

En appliquant le premier principe et l'inégalité de Clausius au fluide caloporteur, montrer l'impossibilité :

- d'un moteur monotherme ;
- d'un moteur polytherme au contact de thermostats de même température.

Ainsi, une **machine monotherme** (dont le fluide caloporteur n'est au contact qu'avec un seul thermostat au cours d'un cycle) ne peut pas fonctionner comme un moteur, autrement dit fournir un travail ($W < 0$).

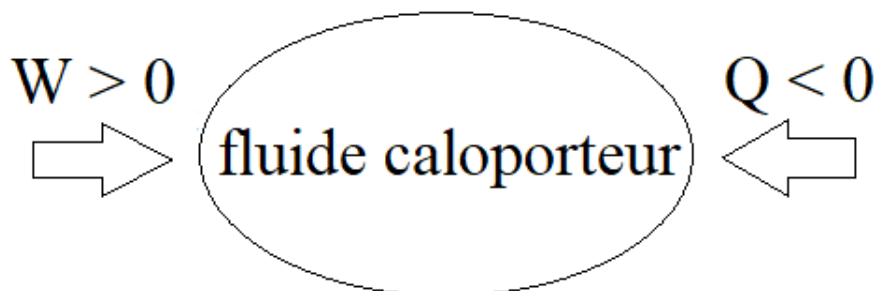


FIGURE 1 – Diagramme synoptique d'une machine thermique monotherme

Une telle machine joue en fait le rôle de radiateur. Elle reçoit du travail électrique et fournit en contrepartie de l'énergie thermique à son environnement froid pour le réchauffer.

Plus généralement, il est impossible de convertir directement du transfert thermique Q en travail W (alors que l'inverse est possible, il suffit de se frotter les mains pour s'en rendre compte). Cette "dégradation de l'énergie" est un résultat fondamental, connu sous le nom de théorème de Thomson.

On retiendra que pour fournir du travail, il est nécessaire que le fluide caloporteur soit au contact avec au moins deux sources de chaleur, et que leurs températures soient différentes.

Dans la suite du cours, nous nous focaliserons sur les **machines dithermes** : nous modéliserons les deux sources de chaleur par des thermostats de température uniforme qualifiés de **source chaude** (à la température T_c) et de **source froide** (à la température $T_f < T_c$).

Exercice d'application 2 :

On envisage une machine thermique ditherme où le fluide ne reçoit pas de travail de l'extérieur. Montrer que le transfert thermique passe spontanément de la source chaude vers la source froide.

Le transfert thermique ne passe pas spontanément du froid vers le chaud. Il est donc nécessaire d'apporter du travail au fluide caloporteur pour réaliser un transfert thermique non spontané si on souhaite refroidir la source froide. Concrètement, la température du fluide varie au cours du cycle, de sorte que $T \geq T_c$ lors du contact avec la source chaude, et $T \leq T_f$ lors du contact avec la source froide.

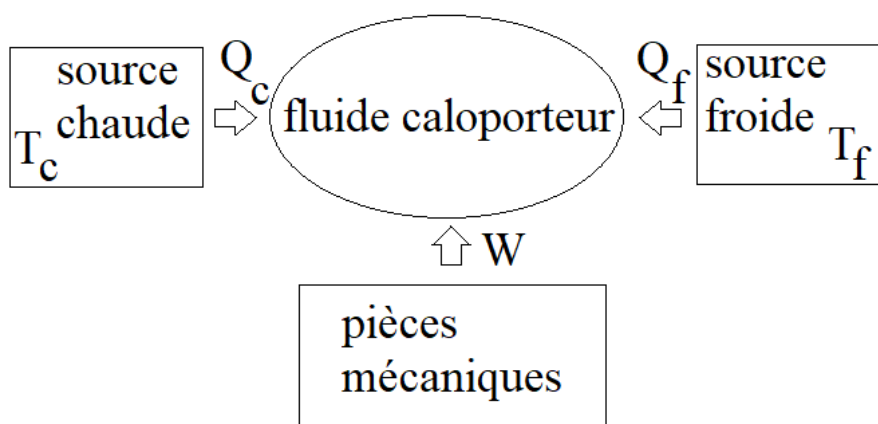


FIGURE 2 – Diagramme synoptique d'une machine thermique ditherme

Le sens réel des échanges d'énergie dépend de la nature de la machine, et est à étudier au cas par cas.

1.3 Représentation diagrammatique d'un cycle de fonctionnement

1.3.1 Cycle en diagramme de Watt

Un diagramme bien pratique pour visualiser le travail reçu par le fluide au cours d'un cycle est le diagramme de Watt (P, V) (ou de Clapeyron (P, v)).

On rappelle en effet que le travail reçu par le fluide sous l'effet des forces de pression au cours d'une transformation s'exprime :

$$W = \int_{V_i}^{V_f} -P_{\text{ext}} dV.$$

Dans le cas où le fluide est à chaque instant en équilibre mécanique avec le milieu extérieur,

$$W = \int_{V_i}^{V_f} -PdV$$

ce qui représente, au signe près, l'aire sous la courbe $P = f(V)$ en diagramme de Watt.

Exercice d'application 2 :

On considère le fluide d'un moteur, modélisé par une quantité n fixée de gaz parfait, effectuant des cycles à quatre étapes quasi-statiques : deux évolutions isochores aux volumes V_1 et $V_2 > V_1$ et deux isobares aux pressions P_1 et $P_2 > P_1$.

1. Représenter le cycle dans le diagramme de Watt.
2. Que dire du travail reçu par le fluide lors des isochores ?
3. Dans quel sens le cycle doit-il être parcouru pour que celui-ci soit moteur ?

Ce que nous venons de voir sur cet exemple est très général :

▷ dans un diagramme de Watt, l'aire du cycle est égale à la valeur absolue du travail ;

▷ un cycle est moteur s'il est parcouru dans le sens horaire : le fluide caloporteur fournit du travail.

1.3.2 Cycle en diagramme T-S

De la même manière, si le fluide subit une transformation réversible, on peut écrire

$$Q = \int_{S_i}^{S_f} TdS.$$

Dans le diagramme (T, S), l'aire du cycle est égale à la valeur absolue du transfert thermique. Si le cycle est parcouru dans le sens horaire, le fluide caloporteur reçoit du transfert thermique au cours du cycle.

2 Machines dithermes

Dans la suite du cours, nous allons présenter brièvement les principaux types de machines thermiques, en mettant l'accent sur deux aspects :

- ▷ le sens réel des échanges d'énergie ;

▷ le calcul du **coefficient de performance** (COP) théorique maximal. On définit le coefficient de performance par la relation :

$$\text{COP} = \frac{|\text{transfert d'énergie souhaité}|}{|\text{transfert d'énergie dépensé}|}$$

Il est d'usage de l'appeler **efficacité** (notée e) si il peut prendre des valeurs supérieures à 1, et **rendement** (noté η) si sa valeur est forcément comprise entre 0 et 1.

2.1 Moteur ditherme

2.1.1 Sens réel des échanges d'énergie

Un **moteur thermique** est une machine thermique qui cède du travail au milieu extérieur : $W < 0$.

Dans un moteur thermique ditherme, les transferts thermiques se font dans le sens naturel. Le fluide caloporteur reçoit du transfert thermique de la part d'une source chaude ($Q_c > 0$). Cette énergie est apportée par une combustion, qui peut être interne ou externe. Le fluide restitue une partie de cette énergie sous forme de travail, et cède le reste sous forme de transfert thermique à une source froide ($Q_f < 0$), qui est souvent l'air ambiant.

C'est le principe de fonctionnement des vieilles machines à vapeur, mais aussi des moteurs à essence, diesel, de Stirling, etc.

2.1.2 Rendement d'un moteur

Dans un moteur, l'énergie que l'on souhaite récupérer est $|W| = -W$. L'énergie qu'on dépense pour ce faire est Q_c , car elle est issue d'une combustion. On définit alors le **rendement d'un moteur ditherme** par :

$$\eta = \frac{-W}{Q_c}$$

Si les transformations du fluide caloporteur sont réversibles, le cycle qu'il parcourt est qualifié de **cycle de Carnot**, associé à un **rendement de Carnot** :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Le rendement de Carnot est la valeur maximale théorique du rendement, elle correspond au cas d'égalité dans l'inégalité de Clausius. La conversion de transfert thermique en travail ne peut pas se faire intégralement, mais plus l'écart de température entre la source froide et la source chaude est grand, plus cette conversion est efficace.

Comme un contact entre deux corps de températures différentes est une source d'irréversibilité, cela impose que les transferts thermiques se fassent lorsque le fluide est à la température des sources : le cycle de Carnot est donc constitué de deux adiabatiques et de deux isothermes, toutes réversibles.

Exercice d'application 3 :

1. Établir l'expression du rendement de Carnot d'un moteur. Faire une application numérique en proposant des ordres de grandeur pour les températures des sources chaude et froide.

2. Représenter un cycle de Carnot en diagramme (T,S). Déterminer son sens de parcours.

3. Représenter un cycle de Carnot d'un gaz parfait en diagramme (P,V). Déterminer son sens de parcours.

4. Expliquer pourquoi, dans un moteur réel, on n'essaie pas forcément de s'approcher du rendement de Carnot.

Le rendement d'un moteur thermique réel est souvent compris entre 10% et 40%.

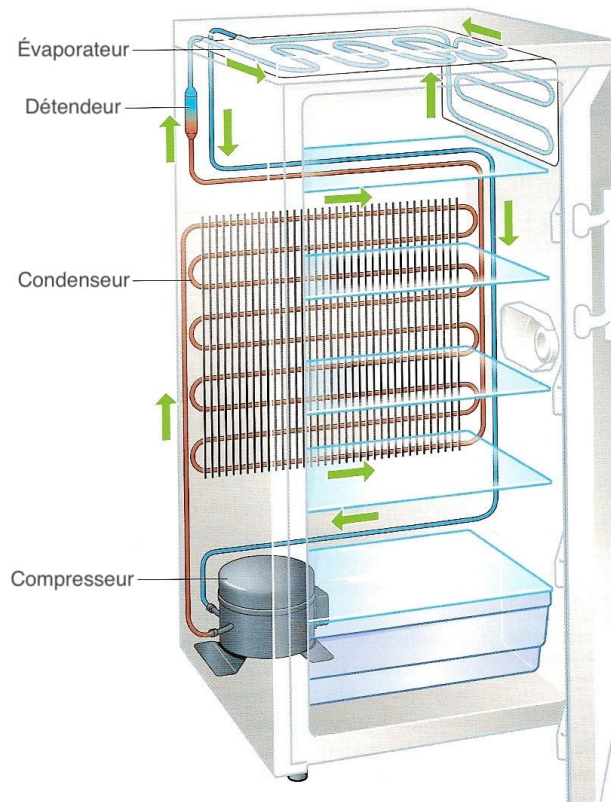
2.2 Récepteurs thermiques dithermes

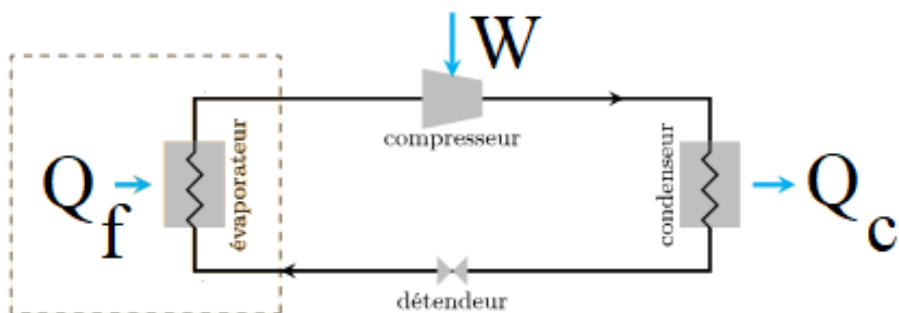
Dans les récepteurs thermiques, tels que les **machines frigorifiques** et les **pompes à chaleur**, les transferts thermiques se font en sens inverse de ceux qui ont lieu dans un moteur : en donnant du travail $W > 0$ au fluide, on permet à ce dernier de recevoir un transfert thermique de la part de la source froide ($Q_f > 0$) et d'en céder à la source chaude ($Q_c < 0$).

Bien sûr, cela se fait sans violer le deuxième principe de la thermodynamique, ce qui suppose que le fluide est plus chaud que la source chaude, et plus froid que la source froide lors des étapes du cycle où il est en contact avec elles. En absorbant ou en cédant du transfert thermique, il change d'état au cours du cycle.

2.2.1 Machines frigorifiques

Une machine frigorifique est constituée de quatre éléments, mis en évidence dans les schémas ci-dessous.





Le but d'une **machine frigorifique** est de prendre de l'énergie à la source froide (l'intérieur du frigo) : l'énergie utile est donc Q_f . La source chaude est l'air de la pièce. L'énergie dépensée est le travail W au niveau du compresseur.

L'**efficacité d'une machine frigorifique** est définie comme le quotient :

$$e = \frac{Q_f}{W}.$$

L'efficacité optimale, dite de Carnot et notée e_C , est obtenue si toutes les transformations sont réversibles :

$$e_C = \frac{T_f}{T_c - T_f}.$$

Exercice d'entraînement 4 :

On considère un frigo idéal, dont le fluide frigorigène ne subit que des transformations réversibles. L'intérieur du frigo est à 5°C , tandis que la cuisine est à 20°C .

Établir l'expression littérale de son efficacité de Carnot. Faire l'application numérique.

L'efficacité usuelle d'une machine frigorifique réelle (réfrigérateur, congélateur, climatiseur...) est généralement comprise entre 3 et 4.

2.2.2 Pompes à chaleur



FIGURE 3 – Photographie d'une pompe à chaleur

Le but d'une **pompe à chaleur** (ou PAC) est de céder de l'énergie à la source chaude (par exemple, l'intérieur d'une maison, plus chaud que l'extérieur qui joue alors

le rôle de source froide). L'énergie utile est alors $-Q_c$. L'énergie fournie est, comme pour le frigo, $+W$. L'efficacité d'une pompe à chaleur est donc

$$e = \frac{-Q_c}{W}.$$

Une fois encore, l'efficacité maximale théorique est l'efficacité de Carnot, e_C , obtenue si toutes les transformations étaient réversibles :

$$e_C = \frac{T_c}{T_c - T_f}.$$

L'efficacité usuelle d'une pompe à chaleur réelle (système de chauffage, chauffe-eau thermodynamique...) est généralement comprise entre 2 et 5.

2.3 Résumé

machine	W	Q_c	Q_f	COP	COP_C
moteur	< 0	> 0	< 0	$\eta = \frac{-W}{Q_c}$	$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$
frigo	> 0	< 0	> 0	$e = \frac{Q_f}{W}$	$e_C = \frac{T_f}{T_c - T_f}$
pompe à chaleur	> 0	< 0	> 0	$e = \frac{-Q_c}{W}$	$e_C = \frac{T_c}{T_c - T_f}$