

THERMODYNAMIQUE

2^e année – Semestre 4/4x

EC 04 02 SB 0104

Karl DELBÉ
Karl.Delbe@enit.fr

Jean-Yves PARIS
Jean-Yves.Paris@enit.fr

Lecture N° 2

MACHINES THERMIQUES

II. CYCLES THERMODYNAMIQUES — RENDEMENT

II.1. Introduction	7
II.2. Bilans énergétique et entropique associés à un cycle	7
II.3. Les cycles monothermes — Machines monothermes	8
II.4. Cycles dithermes.....	9
II.5. Les machines à vapeur à combustion externe (moteur thermique)	10
II.6. Machines frigorifiques et pompes à chaleurs.....	14

II. CYCLES THERMODYNAMIQUES RENDEMENT

(Origine historique du deuxième principe)

I.1 Introduction

a) Caractéristiques d'une machine thermique

☞ Une *machine thermique* est un dispositif dans lequel un *fluide*²⁴ (air, eau, fréon...) décrit un *cycle de transformations*.

☞ Une machine thermique *échange de l'énergie*, par *transfert thermique*, avec *une ou plusieurs sources de chaleur*.

b) Moteur et récepteur

Une machine thermique est un **moteur** si elle *fournit* du travail ($W_{\text{cycle}} < 0$).

Par opposition, un **récepteur** (machines frigorifiques, pompe à chaleur) est une machine qui *reçoit* du travail ($W_{\text{cycle}} > 0$).

I.2 Bilans énergétique et entropique associés à un cycle

L'analyse thermodynamique du fonctionnement des machines (bilans énergétiques et entropiques) sera conduite en assimilant le fluide moteur au système.

Considérons une machine thermique qui, au cours d'un cycle, échange un travail W avec le milieu extérieur et les quantités de chaleur Q_i avec les sources de chaleur de température constante T_i (thermostats).

a) Bilan énergétique

Pour un cycle de la machine, l'application du premier principe donne :

$$W + \sum_i Q_i = 0$$

car $\Delta E = \Delta(U + E_c + E_p) = 0$, (fonctions d'état).

²⁴ Ce fluide est appelée **fluide moteur**.

b) Bilan entropique

Appliquons le deuxième principe à l'ensemble (fluide, milieu extérieur).

$$\Delta S_{syst} = S_{ech} + S_{prod}$$

• $\Delta S_{syst} = 0$, puisque le fonctionnement de la machine est cyclique et que S est une fonction d'état.

$$\bullet S_{ech} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i}$$

$$\bullet S_{prod} \geq 0$$

Bilan entropique pour une machine thermique²⁵ :

$$S_{prod} = -S_{ech} = -\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \geq 0$$

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

I.3 Les cycles monothermes - Machines monothermes

a) Définition

Un **cycle monotherme** est une évolution cyclique au cours de laquelle le système n'échange de la chaleur qu'avec **une seule source de chaleur** ou un ensemble de sources de chaleur de même température. Une machine thermique fonctionnant sur ce principe est appelée **machine monotherme**.

b) Réalité des cycles monothermes récepteur et moteur

Considérons une machine monotherme qui, à chaque cycle, échange un travail W et une quantité de chaleur Q avec une source de chaleur (thermostat) de température T_0 . À partir des bilans énergétique et entropique, nous obtenons :

$$Q = -W \text{ et } \frac{Q}{T_0} \leq 0$$

T_0 étant positive, la condition de réalisation d'un cycle monotherme impose que Q soit négatif. En conséquence, W ne peut être que positif. Donc :

²⁵ Cette relation porte le nom d'« **inégalité de Clausius** » ou **principe de Carnot - Clausius**(cf. paragraphe II.9).

➤ Il est **POSSIBLE** de réaliser un cycle monotherme **RECEPTEUR**²⁶ ($W > 0$ et $Q < 0$) : figure 1.a).

➤ Il est **IMPOSSIBLE** de réaliser un cycle monotherme **MOTEUR**²⁷ ($W < 0$ et $Q > 0$) : figure 1.b).

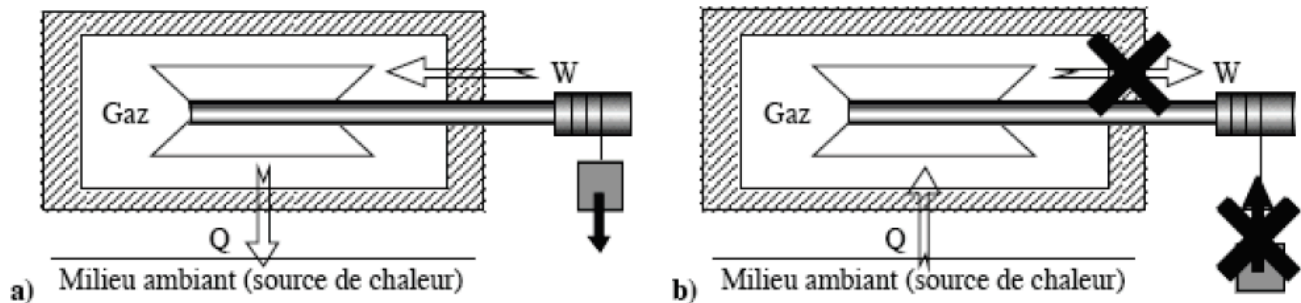


Figure 1 : Système décrivant un cycle monotherme : a) récepteur : le système peut fournir de la chaleur s'il reçoit du travail ; b) moteur : le système ne peut fournir du travail s'il ne reçoit de la chaleur que d'une seule source.

c) Énoncé de Kelvin²⁸

« Il est impossible de construire une machine qui, fonctionnant suivant un cycle, fournirait du travail en prenant de la chaleur à une seule source » ; autrement dit :

« il n'est pas de moteur qui puisse produire du travail à partir d'une seule source de chaleur ».

I.4 Cycles dithermes

a) Définition

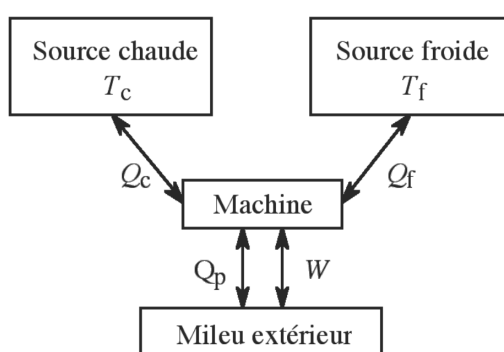


Figure 2 : Schéma de principe d'une machine ditherme ($T_c > T_f$).

Une **machine thermique cyclique**²⁹ ne peut avoir un fonctionnement moteur que si elle échange de la chaleur avec au moins **deux sources de chaleur**.

On appelle cycle ditherme, un cycle à deux sources de chaleur ou thermostats (figure 2) :

– **Source chaude** à la température T_c ;

(Thermostat « chaud » : mélange liquide - vapeur à l'équilibre)

– **Source froide** à la température T_f

(Thermostat « froid » : mélange solide - liquide à l'équilibre)

²⁶ Un **radiateur électrique** est un exemple de machine réceptrice monotherme. Il reçoit du travail W sous forme électrique et le restitue par transfert thermique à la pièce qu'il doit chauffer.

²⁷ Un **moteur monotherme** serait très intéressant. Si un tel cycle était réalisable, il serait alors possible de fournir du travail en absorbant simplement de la chaleur du milieu ambiant (donc gratuitement car la chaleur du milieu ambiant ne coûte rien). On pourrait par exemple imaginer un navire qui prenne de l'énergie à l'eau qui l'entoure, la transforme en énergie mécanique et laisse derrière lui un sillage d'eau froide.

²⁸ L'**énoncé de Kelvin** constitue une première formulation du deuxième principe.

²⁹ Une **centrale thermique élémentaire** constitue un exemple de machine thermique dans le sens restreint du terme.

La quantité nette de travail (ou travail utile W_u), c'est-à-dire le travail échangé au cours d'un cycle, résulte de transferts thermiques entre, d'une part, la machine et une source chaude (T_c, Q_c) et, d'autre part, la machine et une source froide (T_f, Q_f).

Au niveau des conduites et des organes mécaniques, les frottements dégradent de l'énergie et il peut y avoir des fuites thermiques. On note Q_p l'énergie ainsi transférée ($Q_p < 0$).

b) Bilans énergétique et entropique

Dans la pratique, les frottements et les fuites thermiques sont souvent négligeables :

- Bilan énergétique (premier principe)³⁰ :

$$W + Q_c + Q_f = 0$$

- Bilan entropique (deuxième principe) :

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

I.5 Les machines à vapeur à combustion externe (moteur thermique)

a) Introduction

Les cycles moteurs à vapeur sont utilisés pour la propulsion des sous-marins et des navires de gros tonnage, ainsi que pour la production de l'essentiel de l'électricité, la turbine étant alors accouplée à un alternateur. L'apport d'énergie est réalisé par la combustion de fuel, de gaz naturel ou de charbon (centrales classiques), par la fission de matière radioactive (centrales nucléaires), ou encore à partir d'un gisement de vapeur ou d'eau chaude (centrales géothermiques), du rayonnement solaire (centrales solaires), ou des gaz d'échappement d'une turbine à gaz (cycles combinés).

³⁰ On peut être amené à prendre en compte des échanges thermiques autres que ceux échangés entre le système et les sources chaude et froide : en effet, les frottement dégradent de l'énergie et il peut y avoir des fuites thermiques (canalisation, turbine, compresseur, pompe ...).

L'encombrement d'un cycle à vapeur est, à puissance égale, plus important que celui d'un cycle à gaz, mais le rendement est meilleur, et les puissances installées peuvent être bien supérieures, jusqu'à 1500 MW.

b) Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur (figure 3)

☞ *Le circuit vapeur*

Une quantité de chaleur $Q_c > 0$ est transmise par un corps chaud comme les produits de la combustion dans un fourneau ou un réacteur, à la machine. Dans la **chaudière**, la combustion produit de la vapeur d'eau à haute température ($\theta \approx 565\text{ °C}$) et haute pression ($P \approx 165\text{ bars}$). Cette vapeur d'eau circule dans le circuit vapeur entre la zone de haute pression où elle est produite et la zone de basse pression et basse température créée au niveau du **condenseur**³¹.

Au contact du circuit de refroidissement, l'eau du circuit de vapeur se condense. En se condensant cette vapeur d'eau cède la quantité de chaleur $Q_f < 0$ à l'eau de refroidissement (corps froid ou source froide) du condenseur (les deux circuits sont indépendants).

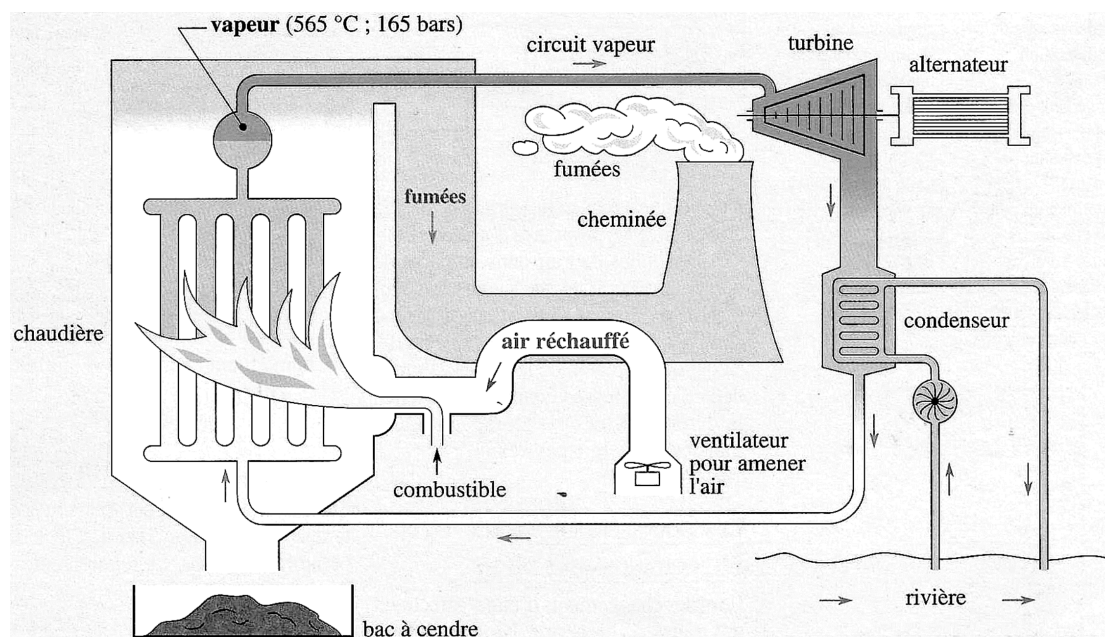


Figure 3 : Schéma de principe d'une centrale thermique élémentaire.

³¹ Pour créer la zone de basse pression, on prélève de l'eau de refroidissement (lac ou rivière) que l'on fait circuler dans des tubes (c'est le système du condenseur)

☞ *L'obtention de travail*

Sur le trajet de la vapeur d'eau, entre la chaudière et le condenseur, on place une **turbine à vapeur**. La vapeur d'eau issue de la chaudière vient frapper violemment les pales de cette turbine : elle fournit à la turbine un travail ($W_{turbine} < 0$).

Dans le même temps, cette vapeur va subir une détente : en effet, la température et la pression de la vapeur diminuant, son volume augmente. Ainsi, la forme de la turbine (figure 4) doit être adaptée à cette augmentation de volume : l'espace entre les aubes est de plus en plus grand au fur et à mesure que la vapeur circule, d'où l'augmentation du rayon des roues.

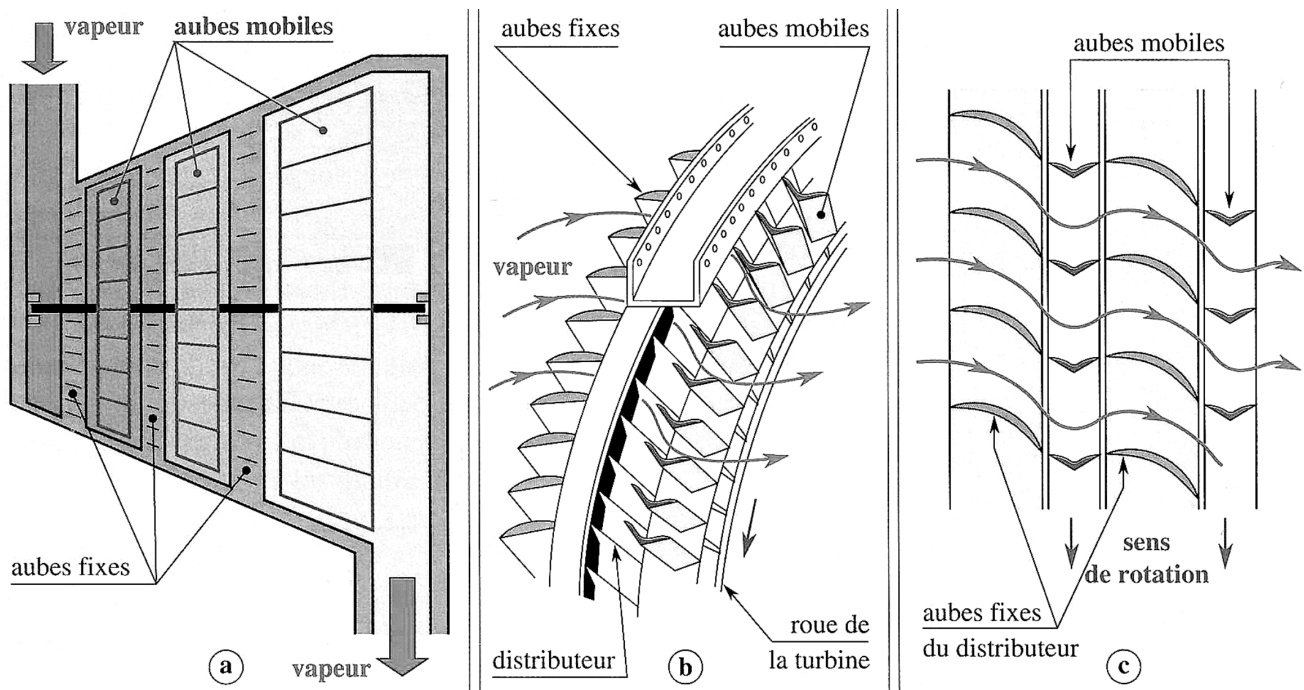
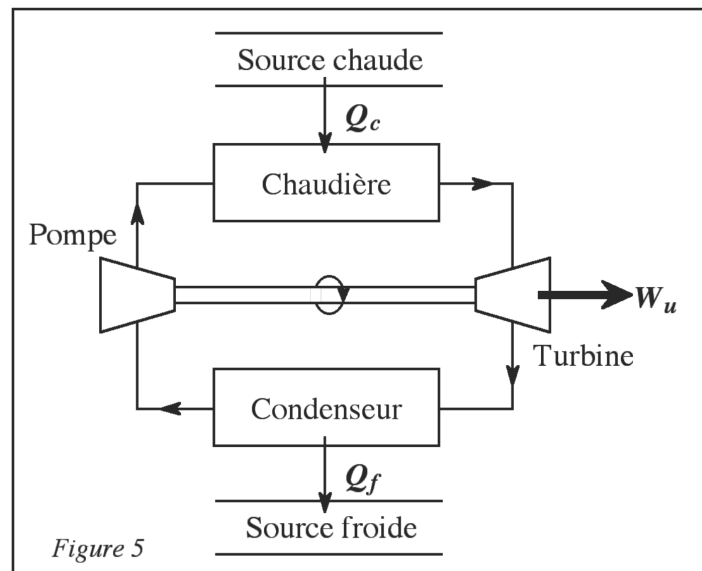


Figure 4 : a) Schéma de principe d'une turbine à vapeur ; b) La vapeur, guidée par les aubes fixes du distributeur, vient frapper les aubes mobiles de la turbine ; c) la forme des aubes permet, en déviant l'écoulement, d'entretenir la rotation.

Après passage dans le condenseur, une **pompe** ($W_{pompe} > 0$) redistribue l'eau à faible pression et faible température dans la chaudière et le cycle recommence.

Cette centrale thermique élémentaire (figure 5) est donc un moteur thermique puisqu'elle utilise pour son fonctionnement, un fluide moteur qui reçoit et cède de la chaleur et qui effectue un travail (ou énergie non thermique, $W_u < 0$).



Par conséquent, un moteur thermique ditherme est une machine thermique qui :

- **fournit effectivement un travail ($W_u < 0$) ;**
- **reçoit effectivement un transfert thermique d'une source chaude ($Q_c > 0$) ;**
- **fournit effectivement un transfert thermique à une source froide ($Q_f < 0$).**

c) Remarques

✓ En général, on considère que les **transferts thermiques** se font **exclusivement** avec les **sources de chaleur**³² : Q_c dans la chaudière et Q_f dans le condenseur.

✓ Le **travail** est, quant à lui, principalement échangé au niveau de la **turbine** et de la **pompe**. W_u représente le **travail effectivement fourni**³³ par la machine thermique au milieu extérieur :

$$W_u = W_{turbine} + W_{pompe}$$

✓ Le fonctionnement d'un moteur thermique vient corroborer l'énoncé de Kelvin.

³² Cependant, on peut être amené à prendre en compte des échanges de chaleur supplémentaires (notés Q_p au §II-4a) qui correspondent à des pertes thermiques intervenant au niveau des canalisations et des organes de machine comme la turbine, le compresseur, la pompe, etc ; sauf indication contraire on considèrera Q_p comme étant **nul**.

³³ Généralement, les forces de pression exercées par le milieu extérieur sur les différentes composantes d'un moteur thermique ne donnent lieu à aucun travail (pas de déformation associée).

d) Rendement d'un cycle moteur

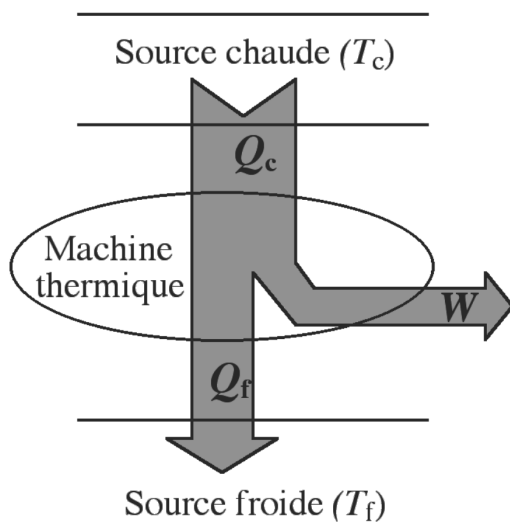


Figure 6 : Représentation symbolique d'un moteur thermique, et des échanges thermiques avec les sources chaude et froide.

Le **rendement thermique**³⁴ d'un **cycle moteur** η , est défini comme le rapport du travail délivré sur l'énergie thermique consommée Q_c , au cours d'un cycle.

D'où, le rendement du cycle s'écrit sous la forme :

$$\eta = \frac{|\text{travail fourni}|}{|\text{énergie dépensée}|} = \frac{-W}{Q_c} > 0$$

On notera que seule une *partie* de l'énergie Q_c prise à la source chaude est convertie en travail (figure 6). L'autre partie est rejetée à la source froide. Ainsi, si l'énergie mécanique peut être convertie en totalité en énergie thermique (c'est l'expérience courante), la conversion inverse, d'énergie thermique en énergie mécanique, ne peut *jamais* être totale. D'où :

$$\eta < 1$$

I.6 Machines frigorifiques et pompes à chaleur

a) Introduction

Une application majeure de la thermodynamique est constituée par les machines dont le but est de réaliser un **transfert thermique d'un milieu à basse température vers un milieu à température plus élevée**.

☞ **Énoncé de Clausius**³⁵

D'après le principe de l'entropie maximum, un tel transfert ne peut s'effectuer naturellement, et requiert donc un dispositif particulier. *Clausius* avait énoncé cette impossibilité ainsi :

« La chaleur ne passe pas spontanément d'un corps froid à un corps chaud ».

Autrement dit : « *Il est impossible de construire une machine qui fonctionnerait en cycle, en ayant d'autre*

³⁴ En général, le rendement est considéré comme le rapport de la grandeur de sortie (l'énergie recherchée) à la grandeur d'entrée (l'énergie à payer). C'est un nombre positif.

³⁵ L'**énoncé de Clausius** constitue une deuxième formulation du deuxième principe.

effet que de transférer de la chaleur du corps froid vers le corps chaud. »

☞ **Différentes classes de machines**

Selon que l'effet recherché est le *refroidissement du milieu froid* (conservation ou congélation des aliments, climatisation de l'habitat, patinoire, etc.), ou le *réchauffement du milieu chaud* (production d'eau chaude sanitaire, chauffage de locaux, de piscines, etc.), ces machines sont respectivement appelées **machines frigorifiques** ou **pompes à chaleur**.

b) Principe de fonctionnement

Il consiste essentiellement à faire parcourir un cycle fermé à un fluide frigorigène (figure 7), qui absorbe de l'énergie du milieu froid ($Q_f > 0$) pour la rejeter ensuite dans le milieu chaud ($Q_c < 0$). Pour réaliser ce transfert thermique, un travail est fourni par un compresseur ($W > 0$).

Le fluide peut être un gaz (de l'air par exemple), mais dans la plupart des cas, on cherche à mettre en jeu l'effet thermique important lié à la transition de phase liquide — vapeur³⁶. Le cycle de base est alors constitué des quatre étapes suivantes (figure 8). La vapeur du fluide frigorigène est comprimée dans un **compresseur**, dont elle sort à une température supérieure à celle du milieu chaud T_c . Cette vapeur passe alors dans un échangeur thermique, le **condenseur**, où elle se condense en cédant par transfert thermique Q_c à ce milieu chaud (eau ou air, en général). Le liquide, qui se trouve toujours à une pression élevée, subit ensuite une détente dans un **détendeur**, où il se refroidit à une température plus basse que celle du milieu froid T_f . Ce fluide traverse un

³⁶ Le fluide moteur est alors un réfrigérant comme le fréon, l'ammoniac ou la vapeur d'eau. On parle aussi de fluide frigorigène. Le **Fréon** (marque commerciale) est le nom d'une famille de gaz hydrochlorofluorocarbonés (HCFC) ou chlorofluorocarbonés (CFC) fabriqués par la société DuPont de Nemours. Les différentes variétés de fréon sont parfois désignées sous le nom de R11, R502, R22 (R signifiant réfrigérant). Ce gaz frigorigène est toxique, non conducteur et ininflammable. Le fréon a été utilisé depuis 1930 comme réfrigérant.

deuxième échangeur, l'**évaporateur**, où il se vaporise en recevant par transfert thermique l'énergie Q_f de ce milieu froid (eau, air, ou saumure). La vapeur froide est enfin renvoyée dans le compresseur et le cycle est alors fermé³⁷.

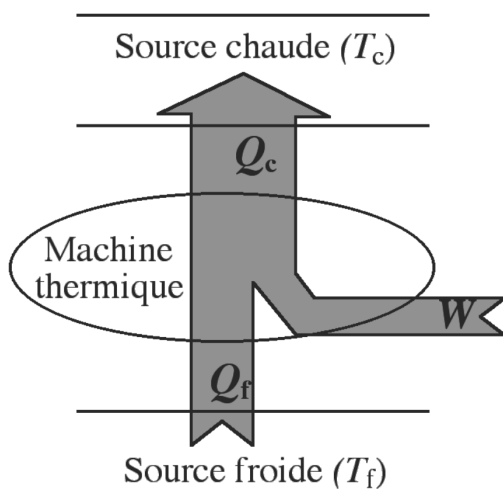


Figure 7 : Représentation symbolique d'un réfrigérateur, et des échanges thermiques avec les sources chaude et froide.

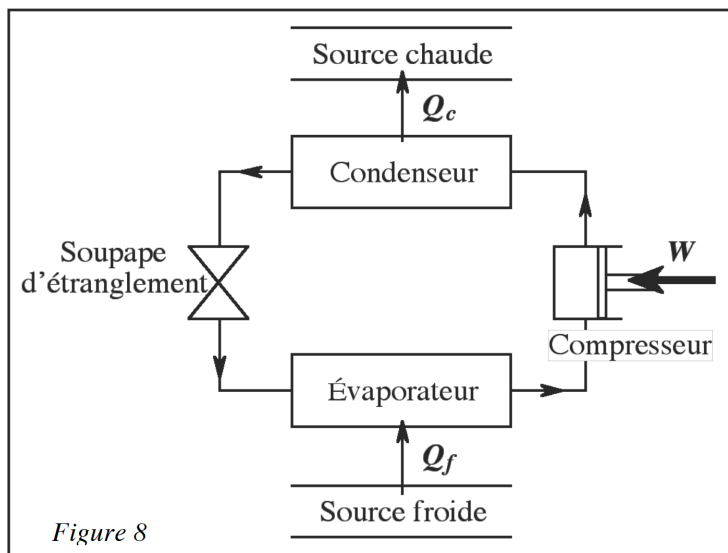


Figure 8

☞ Cas des réfrigérateurs

Dans ce cas, l'évaporateur est installé dans la chambre froide, dont la capacité thermique est finie. L'énergie thermique reçue par le fluide frigorigène³⁸ abaisse donc la température de la chambre froide, puis compense les flux thermiques traversant ces parois. Le condenseur est installé dans un milieu qui peut être considéré comme une source thermique de température constante (air ambiant, rivière, puits, etc.).

☞ Cas des pompes à chaleur

Dans ce cas, le condenseur est installé dans le milieu dont on veut élever la température, alors que

³⁷ Le débit est réglé au niveau du détendeur (détendeur thermostatique) de sorte que la température à l'entrée du compresseur soit supérieure de 4 à 7 °C à la température de saturation.

³⁸ À l'heure actuelle, les fluides réfrigérants les plus utilisés sont l'ammoniac (NH₃) et les chlorofluorocarbones (CFC) R12 et R502 (mélange azeotrope de 48 % de R22 et de 51,2 % de R115). Fortement suspectés de détruire l'ozone 0, stratosphérique, les CFC sont interdits dans la Communauté Européenne depuis le 31 décembre 1994. Ils sont remplacés par d'autres dérivés du méthane et de l'éthane, où le brome remplace le chlore.

l'évaporateur est mis au contact d'une source thermique de température constante (air ambiant, rivière, etc.).

Une machine frigorifique et une pompe à chaleur sont des machines thermiques qui :

- **reçoivent effectivement un travail ($W > 0$) ;**
- **fournissent effectivement un transfert thermique à une source chaude ($Q_c < 0$) ;**
- **reçoivent effectivement un transfert thermique à une source froide ($Q_f > 0$).**

c) Efficacité thermodynamique

☞ *Efficacité d'une machine frigorifique*

L'efficacité d'une machine frigorifique s'exprime par un **coefficient de performance β** . Ce coefficient est positif et compte tenu des échanges énergétiques (figure 7), il peut être supérieur à 1 :

$$\beta = \frac{Q_f \text{ (énergie recherchée)}}{W \text{ (énergie à payer)}}$$

☞ *Efficacité d'une pompe à chaleur*

Dans le cas d'une pompe à chaleur (figures 7 et 8), l'énergie recherchée est la chaleur de la source chaude.

Le coefficient de performance d'une pompe à chaleur est toujours supérieur à 1. Par conséquent :

$$\beta = \frac{-Q_c \text{ (énergie recherchée)}}{W \text{ (énergie à payer)}}$$