



Fiche de synthèse n°5

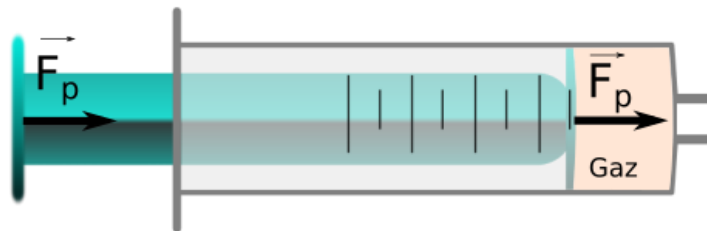
Les machines thermiques

1. Principe de conservation de l'énergie

1.1. Transferts d'énergie

Il existe deux types de transfert d'énergie :

- **Le travail d'une force** : (collection PCM 1ère) : c'est un mode de transfert d'énergie entre deux systèmes qui interagissent **mécaniquement**, c'est-à-dire exercent une force l'un sur l'autre.
Par exemple, lorsque l'on exerce une force sur le piston d'une seringue, celui exerce une force qui **travaille** lorsque le piston se déplace. Le travail des forces de pression dépend de la variation de volume du gaz et de la force pressante.



- **Le transfert thermique** : tout transfert d'énergie qui n'est pas le travail d'une force. Pour rappel il existe trois modes de transfert thermique (convection, conduction et rayonnement).

1.2. L'énergie interne d'un système thermodynamique

C'est l'énergie qui est **stockée** dans le système. On la note traditionnellement **U**. Par exemple l'énergie interne d'un gaz parfait ne dépend que de la température.

Cette quantité d'énergie stockée peut augmenter ou diminuer si des transferts d'énergie ont lieu avec le milieu extérieur.

1.3. Transformations thermodynamiques

Un système thermodynamique est dans un état d'équilibre si toutes les grandeurs physiques associées (pression, volume, quantité de matière...) sont stationnaires (elles ne dépendent pas du temps).

On parle de **transformation** thermodynamique lorsque le système évolue d'un **état d'équilibre** à un autre.

Une transformation thermodynamique peut être, par exemple, la compression d'un gaz, le refroidissement d'un gaz.

1.4. Premier principe de la thermodynamique : principe de conservation de l'énergie

Au cours d'une **transformation thermodynamique**, la variation **d'énergie interne** ΔU d'un système thermodynamique, entre un **état initial** et un **état final**, est égale à la somme des transferts d'énergie avec le milieu extérieur :

$$\Delta U = U_f - U_i = W + Q$$

- **W** : somme des travaux des forces extérieures appliquées au système
- **Q** : somme des transferts thermiques



1.5. Cas particulier d'un cycle thermodynamique

Lorsque les états initial et final d'un système thermodynamique sont identiques, il n'y a pas de variation d'énergie interne.

Une machine thermodynamique fonctionne de manière cyclique : plusieurs transformations ont lieu au cours du cycle, mais les états initial et final du système sont identiques.

Dans le cas d'un **cycle thermodynamique** d'une machine thermique (transformation pour laquelle les états initial et final sont identiques) :

$$\Delta U = W + Q = 0$$

2. Pompes à chaleur et machines frigorifiques : des machines thermiques réceptrices

2.1. Définitions

Une pompe à chaleur échange de l'énergie avec le milieu extérieur que l'on appelle la **source froide** (l'air, le sol ou l'eau d'un puits) et chauffe l'eau qui circule en circuit fermé dans un plancher chauffant ou un radiateur ; c'est la **source chaude**.

Une machine frigorifique est une machine thermique qui permet de réaliser un transfert thermique d'une enceinte (l'intérieur d'un réfrigérateur par exemple, c'est la **source froide**), vers l'extérieur (**source chaude**) pour la refroidir.

2.2. Second principe de la thermodynamique

Une machine thermique réceptrice est donc un dispositif qui permet de réaliser le transfert thermique d'une source froide vers une source chaude.

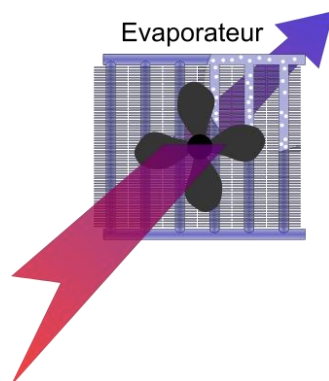
Or ce transfert thermique n'est pas possible spontanément. Un transfert thermique se fait toujours spontanément d'une source chaude vers une source froide.

Énoncé du **second principe de la thermodynamique** : il est impossible de réaliser **spontanément** un transfert thermique d'une source froide vers une source chaude.

2.2. Fonctionnement d'une pompe à chaleur : comment pomper de la chaleur

Une machine thermique est constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide de travail appelé **fluide frigorigène**. Le fonctionnement de cette machine est **cyclique** pour assurer un chauffage **continu**.

Première étape du cycle : à l'extérieur de l'habitation l'évaporateur de la machine permet au fluide frigorigène de capter l'énergie de la source froide. C'est pour cela que l'on dit que la machine pompe la chaleur. Autrement dit l'**évaporateur** est un **échangeur thermique**.



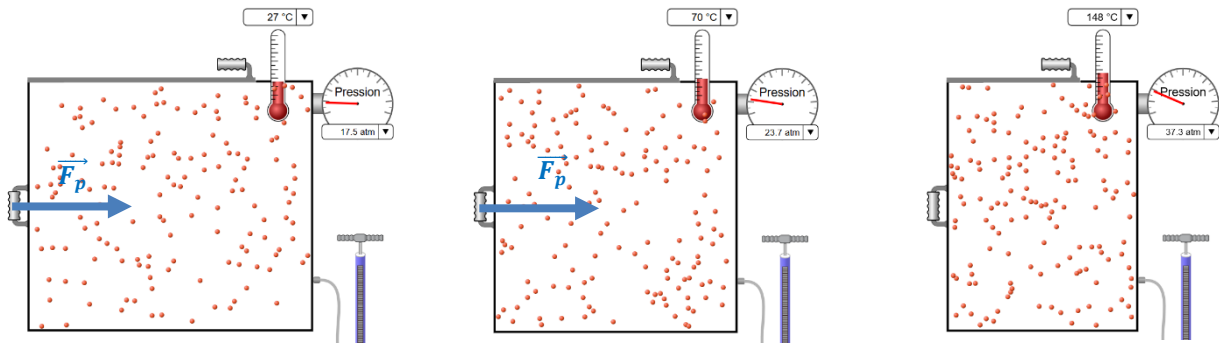


L'évaporateur : un échangeur thermique

Dans l'évaporateur, le transfert thermique permet au fluide frigorigène de changer d'état (c'est l'évaporation : passage de l'état liquide à l'état gazeux). Ce changement d'état est possible car la température d'ébullition du fluide frigorigène est très inférieure à la température de l'environnement extérieur (source froide).

Deuxième étape : la compression

Le fluide frigorigène à l'état gazeux et à basse pression va être comprimé. L'augmentation de pression va s'accompagner d'une augmentation de température.



Augmentation de la température d'un gaz par compression adiabatique

On suppose que la compression est adiabatique, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de transfert thermique vers l'extérieur de la chambre de compression. Cette hypothèse est fondée car le processus de conduction thermique à travers les parois du compresseur ne peut se faire pendant la durée de la compression extrêmement rapide.

Autrement dit l'application du premier principe de la thermodynamique nous donne la relation suivante :

$$\Delta U = W_p$$

La variation de l'énergie interne du fluide frigorigène est égale au travail des forces de pression du compresseur qui est positif. Ainsi l'énergie interne du fluide augmente. Par conséquent l'agitation thermique des molécules du fluide frigorigène augmente, ce qui entraîne une augmentation de la température du fluide.

Troisième étape : la condensation

Le fluide frigorigène passe de l'état vapeur à l'état liquide permettant ainsi de transfert thermique vers la source chaude. Cette énergie peut être cédée à l'eau du plancher chauffant ou d'un radiateur au sein d'un échangeur fluide frigorigène / eau.

Quatrième état : la détente

Cette dernière étape permet de diminuer la pression du fluide frigorigène qui est à l'état liquide.

2.3. Principe de fonctionnement d'une machine thermique réceptrice

Une **machine thermique** est un système fonctionnant grâce à un **fluide** auquel on fait subir des **transformations thermodynamiques** afin de réaliser un échange d'énergie par transfert thermique et par travail avec l'extérieur.

Pour assurer un fonctionnement en continu, une machine thermique doit fonctionner en **cycles** : le fluide qui circule dans la machine revient dans son état initial après un cycle.

Au cours d'un cycle, le fluide d'une machine thermique va être en contact avec deux sources thermiques, une source froide à la température T_F et une source chaude à la température T_C .

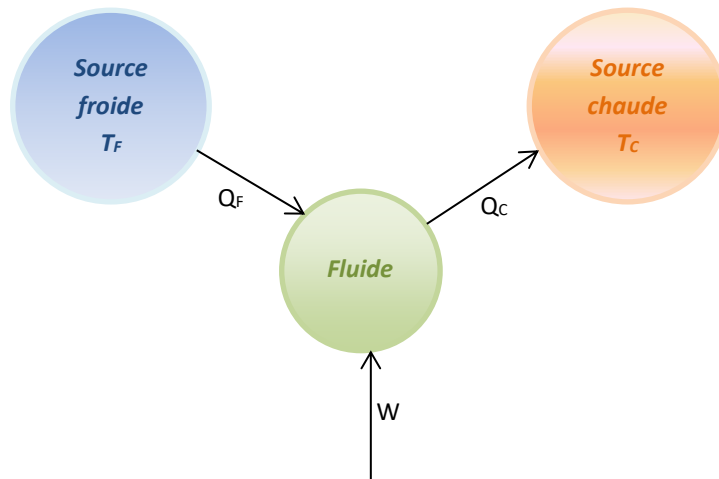


Fig. 1. Représentation d'une machine thermique réceptrice

La machine échange une énergie thermique Q_C avec la source chaude, Q_F avec la source froide et un travail W avec l'extérieur.

Une **machine thermique réceptrice** reçoit du travail de l'extérieur et transfère de l'énergie thermique d'une source froide vers une source chaude.

Il existe une **convention de signes d'un système thermodynamique** : l'énergie que le système reçoit du milieu extérieur est positive et l'énergie fournie par le système au milieu extérieur est négative.

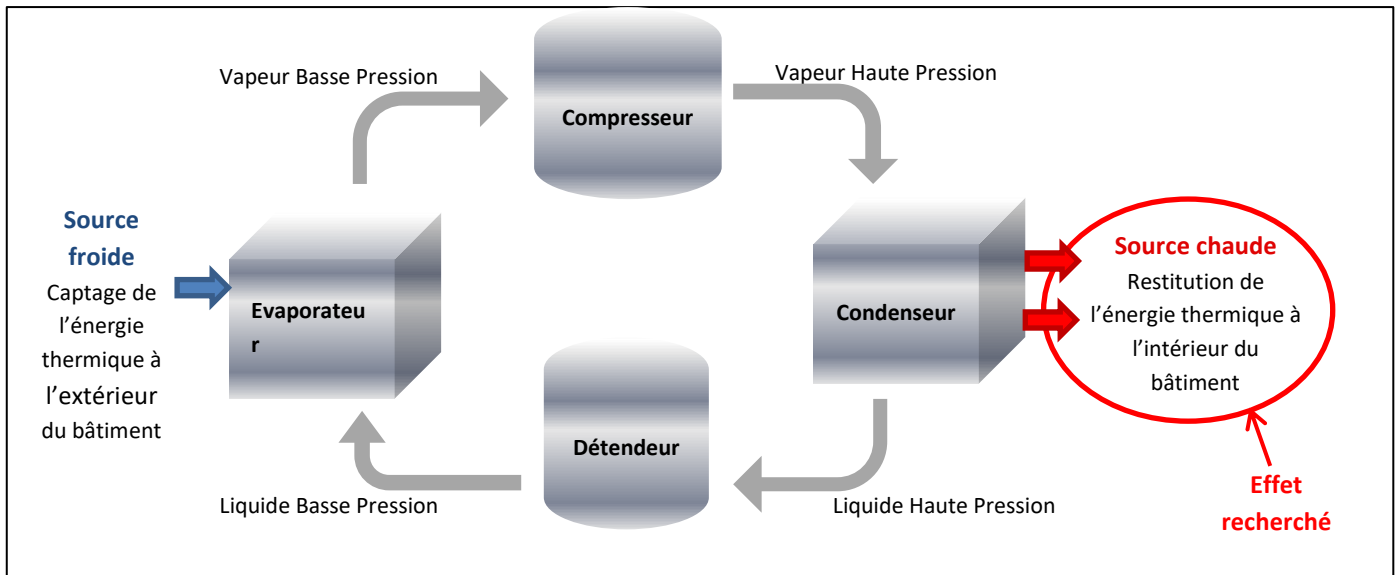
Il en résulte $W > 0$, $Q_C < 0$ et $Q_F > 0$.

Les deux machines thermiques réceptrices sont le **réfrigérateur** et la **pompe à chaleur**.

Pour ces deux machines ce circuit est composé de quatre éléments principaux : un compresseur, un détendeur et deux échangeurs thermiques (le condenseur et l'évaporateur). Lors d'un cycle, le fluide frigorigène change d'état (liquide ou vapeur) et se trouve à des pressions et des températures différentes.

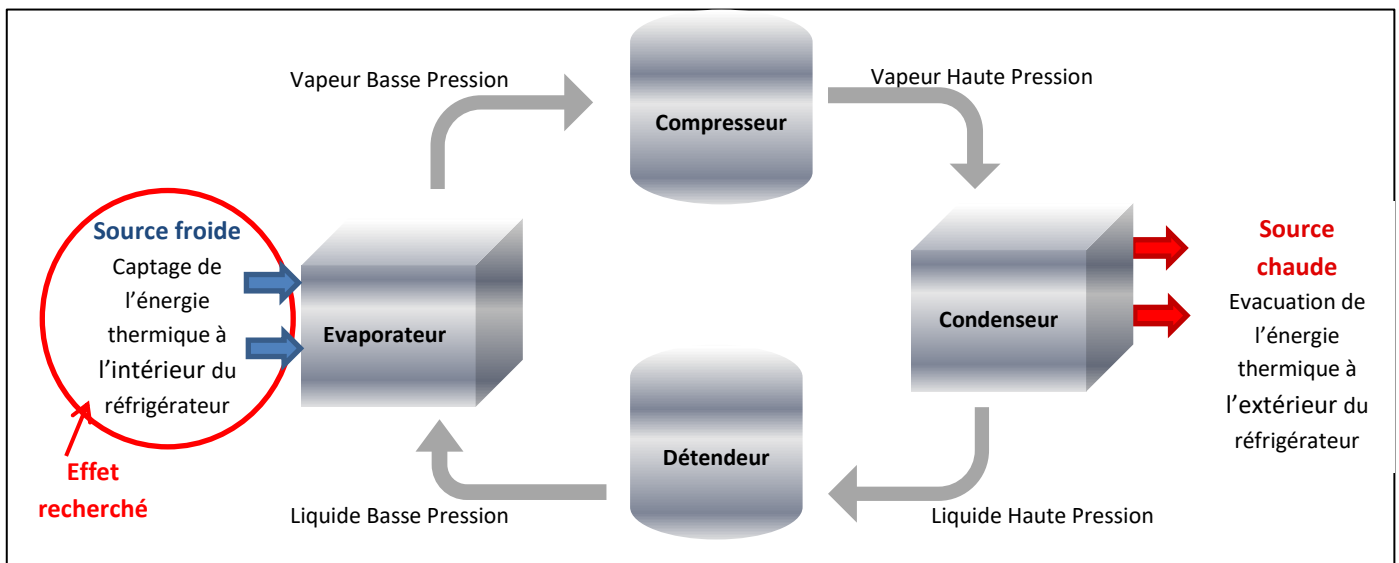
Les quatre étapes du cycle sont détaillées ci-dessous :

- **La compression** : Le compresseur comprime le fluide à l'état vapeur et augmente ainsi sa pression et sa température.
- **La condensation** : Dans le condenseur, le fluide frigorigène cède de l'énergie thermique en passant de l'état vapeur à l'état liquide.
- **La détente** : En traversant le détendeur, la pression et la température du fluide frigorigène à l'état liquide diminue.
- **L'évaporation** : Dans l'évaporateur, le fluide frigorigène capte de l'énergie thermique et passe ainsi de l'état liquide à l'état vapeur.



Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

Dans le cas d'une **pompe à chaleur**, l'énergie cédée au condenseur est utilisée par le fluide frigorigène pour la production de chaleur à l'intérieur du bâtiment (pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire). Au niveau de l'évaporateur, l'énergie thermique est captée à l'extérieur du bâtiment (dans l'air, l'eau ou le sol).



Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur

Dans le cas du **réfrigérateur** (Fig. 3.), l'énergie thermique récupérée par le fluide frigorigène au niveau de l'évaporateur est captée à l'intérieur du réfrigérateur afin de créer du froid. Au condenseur le fluide frigorigène cède de l'énergie à l'extérieur du réfrigérateur.

3. Efficacité énergétique et coefficient de performance (COP) d'une machine thermique réceptrice

3.1. Bilan énergétique d'une machine thermique réceptrice

Pour une machine thermique cyclique, le premier principe s'écrit :

$$\Delta U = W + Q_C + Q_F = 0$$



3.2. Coefficient de performance

La performance d'une machine thermique s'exprime par le **coefficient de performance (COP)**. Le COP est défini comme étant le rapport entre la quantité d'énergie thermique utile transférée par la machine et l'énergie consommée sous forme de travail pour réaliser ce transfert (énergie utilisée pour faire fonctionner le compresseur).

$$COP = \frac{\text{Energie thermique utile transférée}}{\text{Energie consommée pour réaliser le transfert}}$$

Plus le COP est élevé, plus la machine thermique est performante.

Pour une pompe à chaleur : $COP = \frac{|Q_C|}{W_{elec}}$

Pour une machine frigorifique : $COP = \frac{Q_F}{W_{elec}}$ (le COP est aussi appelé EER, coefficient d'efficacité frigorifique)

On entend par W_{elec} , l'énergie électrique consommée pour faire fonctionner la machine thermique.

3.3. Premier principe de la thermodynamique appliqué aux machines thermiques : bilan énergétique

Premier principe dans le cas d'un processus cyclique : $\Delta U = W + Q = 0$

Donc, pour une machine thermique, le premier principe s'écrit : $\Delta U = W + Q_c + Q_f = 0$

3.4. Influence de la différence de température des deux sources thermiques

Le coefficient de performance est fonction de la différence de température entre la source froide et la source chaude : plus cette différence est faible, plus le coefficient de performance est élevé.