

LA THEORIE DES MACHINES FRIGORIFIQUES

I- Généralité :

En soi, la notion de machine frigorifique n'est pas exacte, car il n'existe pas de machine capable de produire du **froid**, puisque d'un point de vue **physique**, le froid n'existe pas. La **chaleur** est définie comme un **état de mouvement moléculaire** de la **matière** qui ne cesse qu'à **zéro absolu**, soit pour $T = 0\text{K}$ où $t = -273,15^\circ\text{C}$.

A cette **température**, toute **matière** est **solide** et pour toute température supérieure, on dispose déjà d'un peu de chaleur. Par conséquent, pour refroidir, il faut enlever de l'énergie calorifique. Mais comme cette énergie ne peut disparaître, il faut la transmettre, à niveau de température plus élevé, à un médium réfrigérant. La quantité de chaleur transférée doit donc être pompée d'un niveau de température inférieur (refroidissement souhaité) à un niveau de température plus élevé (réchauffement conséquent). Ce qui, suivant le **second** principe de la **thermodynamique**, ne peut jamais se faire tout seul, mais seulement au moyen d'une **dépense d'énergie** pour le **pompage** – exactement comme de l'eau ne remonte jamais seule une **pente**.

Toute machine capable de réaliser un tel cycle thermodynamique est appelée, suivant l'effet qu'on en attend :

- **machine frigorifique** quand la quantité de chaleur retirée pour abaisser un niveau de température donné correspond à la température frigorifique Q_0 souhaitée,
- **pompe à chaleur** quand la quantité de chaleur transférée d'un bas niveau de température à une température supérieure correspond à l'émission calorifique Q souhaitée.

En vue de réaliser un tel cycle thermodynamique, il existe différentes méthodes reposant sur divers processus physiques. Les plus usités sont :

- **Le cycle frigorifique à pression, avec support d'énergie calorifique :**

cycle à pression de vapeur utilisant le changement d'état d'un fluide frigorigène (phase liquide-phase vapeur-phase liquide), le **cycle à compression de gaz**, utilisant comme fluide frigorigène de l'air, le cycle s'effectuant sans changement de phase, le **cycle à éjection de vapeur (steam-jet)** utilisant la vapeur d'eau comme fluide moteur et l'eau comme fluide frigorigène.

- **Le cycle frigorifique à absorption, avec apport d'énergie calorifique,**

- **Le cycle frigorifique thermodynamique, avec apport d'énergie électrique** (ou réfrigération avec l'effet **Peltier**).

II- Bilan énergétique :

Dans tout processus de **conversion énergétique**, donc ici également dans un cycle thermodynamique, la somme de l'énergie fournie doit être égale à la somme de l'énergie enlevée. Par conséquent, qu'il s'agisse d'une machine frigorifique ou d'une pompe à chaleur, on a, aux pertes près et en négligeant les dispositifs d'entraînement annexes (**auxiliaires permanents**) :

$$Q_0 + P = Q$$

Q_0 = puissance frigorifique en kW

P = apport d'énergie en kW

Q = rejet de chaleur en kW

(Dans l'ancien système d'unités, dans lequel les quantités de chaleur étaient mesurées en kcal/h, il fallait convertir dans cette équation le travail fourni en chaleur sachant que $1 \text{ CVh} = 635 \text{ kcal}$).

Toutefois, par suite de pertes calorifiques dans le compresseur, la totalité de la puissance fournie P ne se retrouve pas dans la puissance Q du condensateur, mais seulement **80...90%**, si bien que l'on a :

$$Q = Q_0 + (0,8...0,9) P.$$

Mais les conditions de fonctionnement d'une installation frigorifique ou à pompe à chaleur ne dépendent pas seulement de l'équation fondamentale précédente relative au cycle thermodynamique, mais également des **bilans énergétiques** des **débits massiques** sur les côtés chaud et froid y compris les différences de température qui en résultent, ainsi que des différences de température résultant des surfaces d'échange de chaleur installées et des coefficients de transmission thermique atteints.

Un bilan global de la conversion énergétique et des différences de température qui en résultent est donné en partant de l'**exemple** d'un cycle frigorifique à compression de vapeur, cycle que l'on rencontre le plus fréquemment et qui est aussi le plus facile à représenter.

$$Q_0 = GF. CF. (t_{EG} - t_{SG}) \text{ ou}$$

$$= OF (h_{EG} - h_{sg})$$

$$= AF. \Delta t_m F$$

$$Q_0 = f (t, t_0, V_h)$$

$$P = f (t, t_0, V_h)$$

$$Q = Q_0 + \approx P$$

$$= A_c \cdot K_c \cdot \Delta t_m C$$

$$= G_c \cdot C_c \cdot (t_{cs} - t_{cs})$$

La signification des autres lettres est la suivante :

G = débit masse kg/s

h = enthalpie k.J/kg

t₀ = température de vaporisation °C

V_h = volume horaire balayé m³/h

k = coefficient de transmission thermique W/m² K

c = chaleur massique kj/kg K

A = surface en m²

Δt_m = différence logarithmique de température K

Quand le médium d'échange est de l'eau : **t_{EG} - t₀ = t - t_{ER} = 5 à 15 K**

Quand le médium d'échange est de l'air : **t_{EG} - t₀ = t - t_{ER} = 10 à 20 K.**

III- Rentabilité, coefficient de performance :

La **rentabilité** de toute machine est caractérisée par le rapport de la quantité d'énergie utile à la quantité d'énergie absorbée, rapport que l'on désigne en général par le terme **rendement** et qui est toujours inférieur à **1**. Mais par suite de l'apport calorifique sur le côté froid, ce rapport de la quantité d'énergie utile à la quantité d'énergie absorbée est dans le cas d'une pompe à chaleur toujours supérieure à **1** et dans le cas d'une machine frigorifique presque toujours supérieur à l'unité et c'est pourquoi on ne le désigne plus sous le terme général de rendement mais plus précisément comme un **coefficient de performance**. Ce dernier est souvent appelé **coefficient d'effet thermique** lorsqu'il s'agit d'une machine frigorifique ; le coefficient de performance est normalement désigné par **ε**, ou encore par les pompes à chaleur par **COP**.

Pour une machine frigorifique

$$\epsilon_F = \frac{Q_0}{P}$$

Pour une pompe à chaleur

$$\epsilon_C = \frac{Q}{P}$$

Si dans une installation avec pompe à chaleur on utilise en partie simultanément aussi bien la puissance frigorifique que la chaleur rejetée, on obtient d'après la définition énergie utile sur énergie absorbée des coefficients de performances encore plus élevés, à savoir :

en fonctionnement refroidissement

$$\epsilon = \frac{Q_0 + Q_{\text{utile}}}{P}$$

en fonctionnement chauffage

$$\epsilon = \frac{Q + Q_0 \text{ utile}}{P}$$

En introduisant la relation idéale $Q = Q_0 + P$, il vient des deux premières relations :

**émission calorifique maximale
de la machine frigorifique**

$$Q = Q_0 \cdot (1 + \frac{1}{\epsilon_F})$$

**coefficient de performance maximale
de la pompe à chaleur**

$$\epsilon_C = \epsilon_F + 1$$

Pour comparer facilement entre elles des machines frigorifiques ou des pompes à chaleur, le meilleur procédé consiste à utiliser le cycle thermodynamique de **Carnot** :

la machine frigorifique

$$\epsilon_{Fc} = \frac{T_0}{T - T_0}$$

la pompe à chaleur

$$\epsilon_{Cc} = \frac{T}{T - T_0}$$

IV- Cycle frigorifique à compression de vapeur :

C'est le cycle frigorifique le plus important qu'il s'agisse du **froid industriel** ou du **conditionnement d'air** puisqu'il intéresse plus de **90%** de toutes les installations.

La principale caractéristique de ce cycle provient de l'utilisation de fluides frigorigènes qui, à la température de travail t_0 du côté froid passent à l'état liquide à l'état de **vapeur (vaporisation)** aussi grande que possible (production de froid) et qui, à la température de travail t du côté chaud et à la pression régnante, repassent à l'état **liquide (condensation)**. C'est dans ce changement d'état réversible qu'on utilise la **loi physique** liant la température de **vaporisation/condensation** à la pression.

Une installation frigorifique à compression de vapeur se compose principalement d'un **compresseur** avec moteur pour l'apport d'énergie, d'un **condenseur** pour le rejet de chaleur, des **organes de détente (d'expansion, d'étranglement)** destinés à réduire la pression du fluide frigorigène et l'**évaporateur** dont le rôle est d'absorber de la chaleur à l'extérieur (refroidissement). Tous ces éléments sont reliés les uns aux autres par un **circuit de tuyauteries** fermé dans lequel circule le fluide frigorigène.

A- Cycle pratique de la machine à compression de vapeur :

Pour faciliter les calculs, on a l'habitude de représenter graphiquement l'évolution des différents fluides frigorigènes au moyen de diagrammes.

Les changements d'état du cycle frigorifique idéal à compression de vapeur sont les suivants :

- compression adiabatique de la vapeur saturée sèche de p_0 à p , la température finale de pression étant t_h .
- restitution à pression constante de la chaleur de surchauffe (provenant de la marche en régime sec), de la chaleur de vaporisation à la température t et de la chaleur provenant du sous-refroidissement.
- détente isenthalpique de p à p_0 dans un régleur s'il s'agit d'un organe de détente automatique avec déjà vaporisation partielle.
- vaporisation isobare du fluide frigorigène à la température t_0 , la chaleur de vaporisation nécessaire à cet effet étant empruntée au fluide à refroidir.

Dans ce cycle,

$h_1 - h_4$ en kW/kg ou k.J représente la puissance frigorifique,

$h_2 - h_1$ en kW/kg ou k.J/kg représente l'énergie à fournir pour la compression.

B- Comportement des compresseurs de vapeur à pistons :

Tout **compresseur à piston** est défini par son volume balayé V_h lequel résulte de la course des **pistons**, de l'**alésage** des **cylindres**, de leur nombre et de la vitesse de rotation. La puissance frigorifique que l'on peut obtenir avec un compresseur donné, ainsi que sa consommation énergétique et le coefficient d'effet frigorifique dépendent dans une large mesure des températures sur les côtés chaud et froid du cycle.

Exemple : La consommation énergétique électrique d'un compresseur d'une puissance frigorifique $Q_0 = 100 \text{ kW}$ et pour des températures d'évaporation $t_0 = 2^\circ\text{C}$ et de condensation $t = 35^\circ\text{C}$ est $Q_0/EF = 100/4,4 = 22,7 \text{ kW}$.

Le volume géométrique balayé par les pistons est :

pour le R 12 : $V_h = Q_0/0,525 = 100\ 000/525 = 190 \text{ m}^3/\text{h}$,

pour le R 22 : $V_h = Q_0/0,850 = 100\ 000/850 = 118 \text{ m}^3/\text{h}$.

V- Cycle frigorifique à compression de gaz :

Dans ce cycle frigorifique, le fluide frigorigène utilisé est un **gaz dit permanent** qu'il n'est pas possible de condenser aux températures de travail souhaitées. Du point de vue technique, la réalisation de telles installations est pratiquement la même que celle de machines à compression de vapeur, sauf que le gaz n'est pas détendu par un dispositif d'étranglement mais dans une machine spéciale ce qui permet de transformer à nouveau la différence de pression en travail utile en vue de réduire la puissance absorbée par le compresseur. Il faut noter cependant que ce cycle s'écarte nettement plus du cycle idéal de **Carnot** qu'une machine à compression de vapeur et d'autre part que la puissance frigorifique obtenue par kg d'air en circulation est très faible. C'est pourquoi la machine frigorifique à compression de gaz est rarement utilisée en conditionnement d'air, sauf dans certains cas particuliers comme l'**aérage** des **mines**.

VI- Cycle frigorifique à éjection de vapeur :

Dans ce cycle, le fluide frigorigène utilisé est de l'eau. Pour des températures d'évaporation comprises entre **#0** et **+ 10°C** et une pression de saturation correspondante d'environ **7 à 12 mbars**, la vapeur d'eau aspirée de l'évaporateur occupe un volume énorme et cette vapeur ne peut être compressée de façon rentable que dans un éjecteur de vapeur.

La machine à éjecteur de vapeur n'est qu'un cas particulier de la machine à compression avec changement de phase.

Son principe de fonctionnement est donné comme suit :

La **vapeur motrice** provenant d'une ou plusieurs **buses d'alimentation** pénètre dans la **tuyère** de détente d'un éjecteur et aspire les vapeurs en provenance de l'évaporateur.

Dans la partie divergente de l'éjecteur (**tuyère de compression**) la vitesse du mélange diminue progressivement alors que la **pression** augmente jusqu'à la pression de condensation.

Les **condensats** qui se forment dans le condensateur sont renvoyés en partie à la **chaudière**, en partie à l'évaporateur.

Dans l'**évaporateur**, il y a **pulvérisation** de l'eau en provenance du circuit froid et par évaporation, une partie du débit est refroidie à la température de sortie. L'ensemble du cycle ayant lieu sous vide assez poussé, il est indispensable de disposer d'**éjecteurs multiétagés** pour permettre le dégazage du cycle.

VII- Cycle frigorifique à absorption (ou à affinité)

Contrairement au cycle frigorifique à compression, la valeur du **fluide frigorigène** en provenance de l'évaporation n'est pas comprimée mécaniquement, mais d'abord « **aspirée** » dans l'**absorbeur** par un agent absorbant approprié puis dissoute. On pourrait donc parler de « **compresseur thermique** ».

C'est une solution riche en fluide frigorigène (**solution binaire**) qui quitte l'absorbeur pour être renvoyée par l'intermédiaire d'une **pompe à solution** sur le **concentrateur** (ou **générateur** ou **bouilleur**).

Grâce à un apport calorifique, **par exemple**, chauffage à **vapeur** ou par des **gaz brûlés**, combustion du **fuel** ou du **gaz**, l'augmentation de température du fluide frigorigène permet de le chasser par vaporisation dans le condensateur ou à lieu la **liquéfaction**.

Il reste alors dans le bouilleur une solution pauvre en fluide frigorigène qui va directement rejoindre l'absorbeur ou le fluide frigorigène, en provenance de l'évaporateur, est absorbé dans la solution appauvrie en dégageant une certaine quantité de chaleur évacuée par l'eau de refroidissement ; pour faciliter cette réabsorption, la solution appauvrie ruisselle sur les **tubes** contenant l'eau de refroidissement. Entre **deux**, le fluide frigorigène s'est vaporisé dans l'évaporateur, la chaleur nécessaire à cette opération étant empruntée au fluide à refroidir.

Il y a donc **deux circuits** : celui du mélange binaire **solvant + fluide frigorigène** entre l'absorbeur et le concentrateur et celui du **fluide frigorigène** seul entre le bouilleur, le condenseur, l'évaporateur et l'absorbeur.

- **Bilan thermique** : $Q_0 + Q_H = Q_C + Q_A$.

Solution riche et solution pauvre traversent un **échangeur de chaleur** à contre-courants de façon à pouvoir préchauffer la solution riche mais froide par la solution pauvre et chaude et simultanément refroidir cette dernière.

Dans ce cycle, le compresseur est ainsi remplacé par le système absorbeur – échangeur de chaleur – concentrateur y compris le circuit de la solution avec sa pompe de circulation. Cette dernière qui doit faire passer le mélange binaire de la pression d'évaporation à la pression de condensation est la seule partie mobile du circuit.

Avec la solution binaire la plus répandue, à savoir l'**ammoniac** comme fluide frigorigène et l'**eau** comme absorbant, on peut atteindre des températures de vaporisation jusqu'à -60°C . Dans les installations de conditionnement d'air, on utilise souvent le **bromure de lithium (LiBr)** qui présente une très grande affinité pour l'eau. Cette dernière, employée comme fluide frigorigène – comme dans le cas d'un cycle à éjection de vapeur – limite la température d'évaporation à 0°C . Pression d'évaporation **0,01 bar**, pression de condensation environ **0,07 bar**.

VIII- Réfrigération thermoélectrique :

On sait qu'une **tension thermoélectrique** prend naissance entre les **deux soudures** de **deux files de métaux** non identiques maintenus à des températures différentes.

Il s'agit d'un phénomène réversible, dénommé **effet Peltier**, et découvert par ce savant **en 1834** : si l'on applique une tension continue entre les **deux bornes** d'un **circuit électrique** composé de **deux conducteurs** en métaux différents, l'**un des deux points de contact** se réchauffe pendant que l'autre se refroidit.

Si l'on traverse le sens du **courant**, les **températures** des points de contact s'inversent également. Les métaux utilisés comme conducteurs sont à l'origine de **forces thermoélectriques**.

L'utilisation de cet **effet** dans la production du **froid** est d'abord restée longtemps sans application pratique jusqu'à ce qu'on réussisse ces **dernières années** à l'employer avec des **semi-conducteurs**. En reliant entre eux par des **ponts** en **cuivre** des matériaux semi-conducteurs.

Si l'on monte en série plusieurs de ces éléments, on obtient une **pile** de Peltier. Elle est construite de telle façon que tous les **ponts froids** en **cuivre** absorbent la **chaleur** alors que tous les ponts chauds en restituent.

De tels assemblages permettent de réaliser des pompes à chaleur ou à froid dont la puissance atteint actuellement **1 kW** ; mais du point de vue frais d'exploitation, ce sont des **systèmes** plus onéreux que des appareils classiques à compression ou à absorption. Toutefois ils ont l'avantage de ne présenter aucune pièce en mouvement et de ne pas nécessiter de fluide, tels le fluide frigorigène, l'absorbant, etc.

Si, au moyen d'un redresseur sec asservi, par exemple **cellules** au **silicium**, on produit une tension continue à partir d'une tension alternative, il est alors possible de réaliser une **régulation** progressive de la puissance frigorifique ou en fonctionnement pompe à chaleur, de la puissance calorifique.