

## Chapitre 4 : Autres types de machines frigorifiques

### 4.1 Introduction

Il existe plusieurs techniques de production du froid, parmi elles :

- Compression mécanique des vapeurs
- Cycle à air
- Générateur de froid à vortex
- Machine frigorifique à absorption
- Machines frigorifiques thermoélectriques

Ces techniques sont largement utilisées à l'échelle de fabrication et d'utilisation, d'autres techniques existent et ne sont qu'au stade de la recherche au niveau des laboratoires comme la thermoélectricité opérant sur l'effet Peltier et les procédés magnétique basés sur la désaimantation adiabatique.

Les systèmes à compression mécanique des vapeurs restent largement utilisés, leurs applications touchent tous les domaines domestiques et industrielles, les autres technologies ont des applications limitées, leurs coûts élevés et les coefficients de performance faibles.

### 4.2 Les cycles frigorifiques à gaz

Le cycle de Carnot est la référence des cycles moteurs et le cycle de Carnot inversé est la référence des cycles de réfrigération, ce sont des cycles identiques sauf que le dernier fonctionne en sens inverse, d'où les cycles de puissances en les inversant peuvent fonctionner comme une machine frigorifique.

En inversant le cycle de Joule/Brayton on obtient une machine frigorifique communément appelée cycle frigorifique à gaz, comme illustré dans la figure suivante 29, la température de l'ambiance est à  $T_a$  et l'espace à réfrigérer doit être maintenu à la température  $T_F$ , le gaz est comprimé entre l'entrée et la sortie du compresseur 1-2, au point 2 le gaz est à une température et une pression élevées, il est alors refroidi jusqu'à  $T_3$  à une pression constante en rejetant une quantité de chaleur  $Q_c$  à l'atmosphère, cette opération est suivie d'une détente dans une turbine, le gaz sortant aura une température  $T_4$  inférieure à celle de l'atmosphère, le gaz absorbe la chaleur de l'espace réfrigéré jusqu'à sa température arrive à  $T_1$ , et le cycle reprend. Le compresseur et le détendeur sont couplés de façon à récupérer du travail ; le travail net fourni par le moteur est la différence des travaux du compresseur et du détendeur.

Le coefficient de performance sera déterminé par le rapport entre la puissance frigorifique et le travail net qui est la différence entre le travail du compresseur et celui de la turbine :

$$COP = \frac{Q_F}{W_{net}} = \frac{Q_F}{W_{comp} - W_{tur}} \quad (32)$$

La puissance frigorifique est

$$Q_F = (h_1 - h_4) \quad (33)$$

Le travail du compresseur

$$W_{comp} = (h_2 - h_1) \quad (34)$$

Le travail de la turbine

$$W_{tur} = (h_4 - h_3) \quad (35)$$

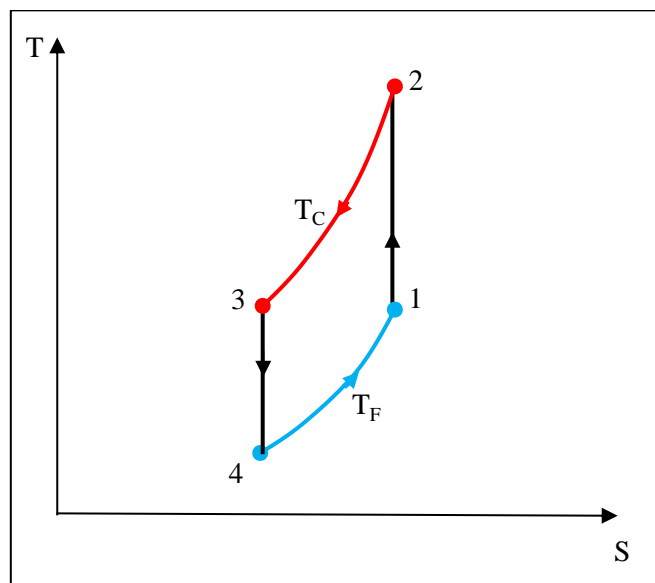
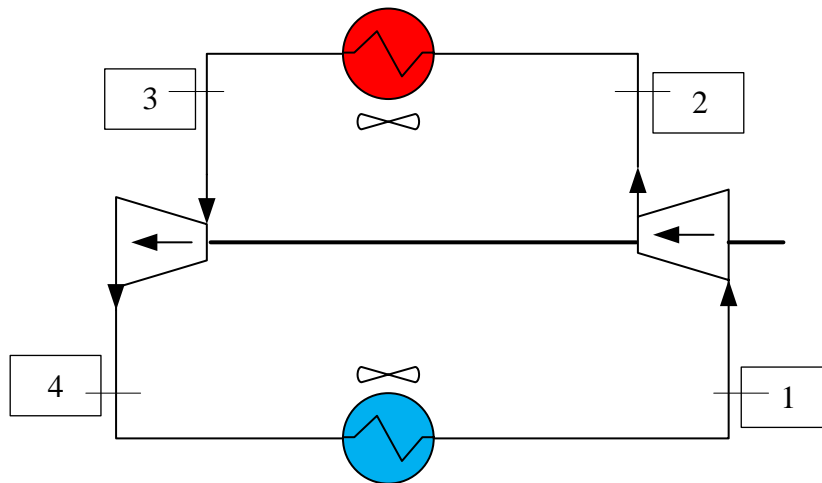


Figure 29– schéma d’une installation frigorifique à gaz

Les processus décrits sont considérés comme réversibles et le gaz comme gaz parfait, en réalité le gaz est un gaz réel et les transformations dans le compresseur et la turbine ne sont pas isentropiques, les températures obtenues seront décalées, et le cycle s’écarte du cycle idéal de Carnot, pour ceux le COP obtenu est beaucoup plus faible que celui d’une machine frigorifique à compression de vapeur ; malgré cette contre-performance ces installations sont utilisées pour leurs faibles poids et leurs simplicité d’organes qui les composent.

Ces installations peuvent être utilisées dans la climatisation de l'air, en absorbant l'air de l'enceinte à refroidir, on le comprime ensuite, on extrait de la chaleur et on le fait passer dans une turbine avant de le pulser vers l'enceinte à refroidir, voir la figure 30 ci-dessous.

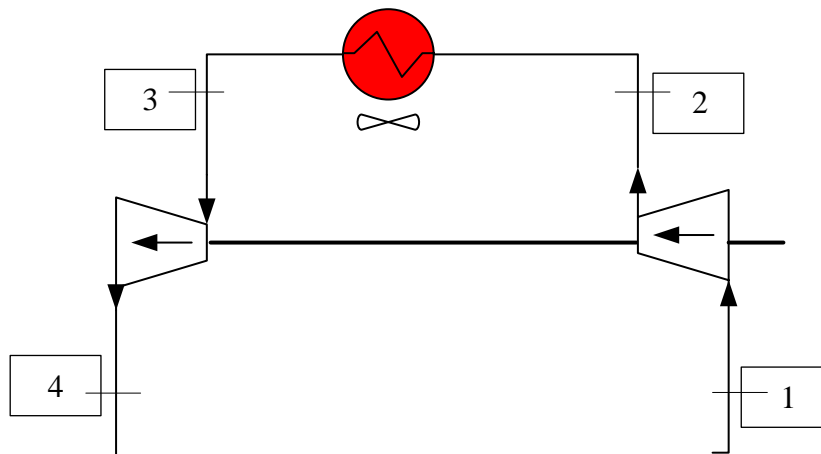


Figure 30– schéma d'une installation frigorifique à air

#### 4.3 Les générateurs de froid à vortex

Les générateurs de froid à vortex, appelé aussi tube de Ranque ou de Hirsch, est un dispositif permettant de produire du froid en mettant du gaz sous pression dans un tube, en se détendant il crée du froid, ce système a été inventé par Ranque en 1931 et amélioré par Hirsch en 1945.

Le gaz entrant par une buse sur la circonférence à une pression et une température données dans le tube, va créer un mouvement tourbillonnaire (vortex), une partie du gaz va sortir d'un côté, une autre partie va être projetée vers l'autre côté, les proportions des débits est réglée par une vanne, on obtient alors du gaz chaud d'un côté et du gaz refroidi de l'autre, il se forme un courant de gaz chaud sur la couche intérieure du tube et un courant de gaz froid au milieu qui peut être récupéré pour une utilisation d'installation de froid ; c'est un dispositif simple ne comportant pas de pièces mobiles, voir figure 31 ci-dessous.

Des installations industrielles utilisant de l'air sous pression, peuvent utiliser le tube vortex pour produire de l'air à des températures basses pour des applications locales de refroidissement, comme le refroidissement des pièces lors de l'usinage, ou le refroidissement de l'eau potable dans un atelier.

Le COP obtenu qui est le rapport entre la puissance de réfrigération rapportée à la puissance de compression du gaz reste faible, on obtient des coefficients de performance allant de 0,1 à 0,15 trop faible par rapport aux machines de compression de gaz.

Les températures à l'entrée et celle des sorties des côtés chaud et froid sont liées par la relation qui donne l'égalité entre les puissances en entrée et en sorties :

$$m_1 c_p T_e = m_2 c_p T_F + m_3 c_p T_C \quad (36)$$

Or, la fraction de volume entrant est égale à celles sortantes, on nomme  $f$  la fraction du côté froid :

$$m_1 = m_2 + m_3 \quad (37)$$

En simplifiant on trouve

$$T_e = fT_F + (1 - f)T_C \quad (38)$$

La puissance frigorifique est déterminée par

$$\dot{Q}_F = f\dot{m}c_p(T_e - T_F) \quad (39)$$

De même la puissance de compression est donnée par

$$\dot{W} = \frac{\dot{m}RT_a}{(k-1)\eta_{comp}} \left[ \left( \frac{P_1}{P_a} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (40)$$

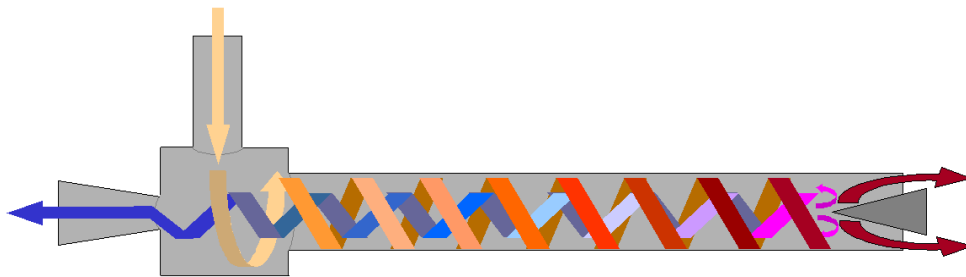


Figure 31– Principe du générateur de froid à Vortex [13]

#### 4.4 Machine frigorifique à absorption

La présence d'une source de chaleur au-delà de 150°C peu onéreuse, permet l'exploitation d'une autre forme de refroidissement économiquement viable basé sur le principe de l'absorption ; en effet ces machines frigorifiques par absorption peuvent être utilisés dans le cas de disponibilité de l'énergie solaire ou géothermale ou tout autre exploitation industriel rejetant des fluides chauds. La machine frigorifique à absorption a été la première machine inventée produisant du froid, elle a été l'œuvre de Ferdinand Carré en 1859 ; des installations industrielles basées sur ce principe ont été fabriquées aux Etats Unis pour produire de la glace et stocker de la nourriture.

Les machines frigorifiques mettent en jeu deux fluides, un réfrigérant et un fluide de transport ; le couple le plus largement employé est le système ammoniac-eau (NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O), où l'ammoniac est le réfrigérant et l'eau sert de moyen de transport, d'autres systèmes fonctionnent avec eau/lithium ou eau/chlorure de lithium, où l'eau sert de réfrigérant. Le refroidissement est basé sur le principe de l'extraction de la chaleur du milieu à refroidir en le mettant dans une enceinte avec pulvérisation de l'eau à la pression sous atmosphérique, l'eau en s'évaporant va absorber de la chaleur, le fluide utilisé est une solution, deux produits sont couramment utilisés :

- Eau/NH<sub>3</sub>      Eau : absorbant, NH<sub>3</sub> : fluide frigorigène.

- Eau/Li-Br    Bromure de Lithium : absorbant, Eau : fluide frigorigène.

Ces machines comportent quatre composants essentiels, comme l'indique la figure 32 :

L'évaporateur dans lequel le fluide frigorigène est pulvérisé, les gouttelettes en contact avec le circuit à refroidir s'évaporent en absorbant de la chaleur, la quantité restante de liquide est recyclée par une pompe.

L'absorbeur dans lequel l'absorbant est pulvérisé pour absorber les vapeurs du fluide frigorigène ramené de l'évaporateur, le liquide dans l'absorbeur est continuellement en mouvement grâce à une pompe de circulation.

Le concentrateur dans lequel la solution est chauffée par une batterie chaude, pour permettre la séparation de l'absorbant du fluide frigorigène, l'absorbant est alors régénéré et véhiculé vers l'absorbeur.

Le condenseur dans lequel sont ramenés les vapeurs du fluide frigorigène puis refroidies et condensés par une batterie d'eau froide, le liquide condensé du fluide frigorigène est renvoyé vers l'évaporateur pour un nouveau cycle.

La circulation d'eau froide dans l'absorbeur permet de limiter la montée de la température de la solution de l'absorbeur, ensuite cette eau froide passe dans le condenseur pour maintenir une température basse acceptable. L'ajout d'un échangeur dans le circuit de l'absorbant économise une partie de l'énergie, le fluide chaud sortant du concentrateur préchauffe le fluide qui va dans le condenseur.

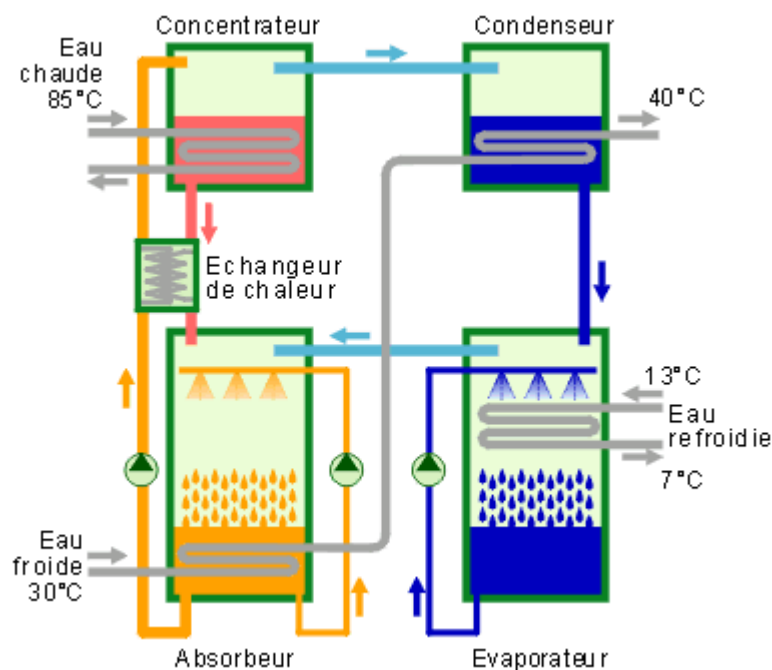


Figure 32– Principe d'une machine frigorifique à absorption [14]

Le travail nécessaire pour faire fonctionner la machine frigorifique provient de la machine thermique dont les températures sont  $T_c$  de la source chaude et  $T_a$  de l'ambiance, le rendement de la machine thermique réversible est alors :

$$\eta = \frac{T_c - T_a}{T_c} = \frac{W}{Q_c} \quad (41)$$

Le coefficient de performance de la machine frigorifique réversible est déterminé par la relation suivante :

$$COP = \frac{T_F}{T_a - T_F} = \frac{Q_F}{W} \quad (42)$$

Le coefficient de performance de la machine frigorifique à absorption, devient ce qui suit :

$$COP_{abs} = \eta \cdot COP \quad (43)$$

#### 4.5 Machines frigorifiques thermoélectriques

Ce sont des machines basées sur le principe de Peltier, lorsqu'on relie deux fils de nature différente et on chauffe une jonction on a un courant électrique qui circule, de même si on fait passer un courant électrique on obtient une jonction chaude et une froide ; les jonctions froides peuvent être regroupées sur une même plaque de même que pour les jonctions froides, voir figure ci-dessous, la plaque froide correspond à la machine frigorifique thermoélectrique, voir la figure 33.

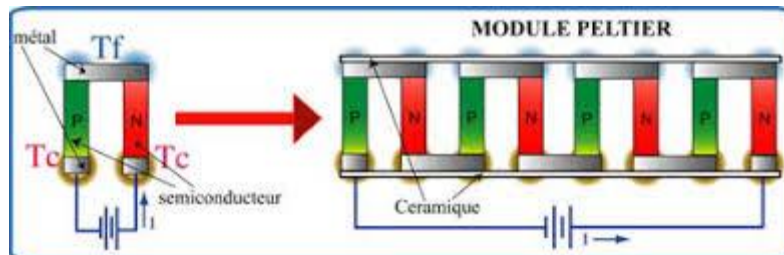


Figure 33– Principe d'une machine frigorifique thermoélectrique [15]

#### 4.6 Exercices

Exercice 1 :

Une machine frigorifique à air, décrit un cycle ; au point A l'état thermodynamiques est  $P_A = 10^5$  Pa,  $T_A = 300$ K. A partir de cet état, on fait décrire à l'air les transformations suivantes :

A à B : compression adiabatique réversible de la pression  $P_A$  à la pression  $P_B = 2 \cdot 10^5$  Pa. B à C : refroidissement isobare de  $20^\circ\text{C}$  ; C à D : détente adiabatique réversible. D à A : échauffement isobare ; On considère que l'air se comporte comme un gaz parfait et que les transformations sont réversibles.  $C_p$  air =  $1000$  J/kg. K ; coefficient isentropique  $\gamma = 1,4$ .

- Calculer les paramètres P et T aux points A, B, C et D.
- Faire le bilan d'énergie subit par un kilogramme d'air.