

Chapitre 1 : Généralités

1.1 Historique du froid

Le froid est une sensation humaine dû aux températures basses contraire au chaud, on a tendance à se vêtir pour se prémunir du froid.

Le froid a été utilisé pour la conservation des aliments depuis les temps anciens, dans les pays nordiques on enfuit les aliments dans la glace pour les conserver, les romains ramenaient les blocs de glace des hauteurs de montagnes pour une utilisation ultérieure en les conservant hermétiquement ; au moyen âge on conservait les aliments dans les caves de châteaux ; Avec l'arrivée des chemins de fer on exploitait la glace des glaciers comme matières premières dans les villes européennes.

On a constaté que le mélange de certains produits abaissé la température de la solution obtenue, l'écrivain arabe Ibn Abi Usaibia (ابن أبي أصيبعة) a été le premier à avoir invoqué l'usage des mélanges en Inde au 4ème siècle dans son livre, l'usage du mélange du nitrate de potassium appelé communément le salpêtre a été cité par le médecin italien Zimara, à Padoue (1530) et le médecin espagnol Blas Villafranca à Rome (1550). Battista Porta (1589) et Tancredo (1607) avait relaté que le mélange de sels et de neige abaissait la température.

- En 1756, William Cullen donne en public la première démonstration de l'obtention de la glace, en créant le vide dans un récipient contenant de l'éther, qui en absorbant la chaleur commence à bouillir, cette chaleur refroidissait l'eau en contact avec le récipient de l'éther, on obtenait alors de faibles quantités de glaces.
- En 1805, Olivier Evans a donné la première description d'un cycle d'une machine frigorifique à compression de vapeur.
- En 1835, Jacob Perkins a breveté un modèle d'une machine frigorifique à compression de vapeur fonctionnant à l'éther éthylique.
- En 1855, James Harrison a breveté des machines à compression qui ont eu un succès industriel, les machines étaient fabriquées en Angleterre et produisaient de la glace et refroidissaient les saumures.
- En 1857, Ferdinand Carré met au point la première machine frigorifique à absorption en fonctionnement continu, en utilisant le couple eau- ammoniac.
- En 1869, Charles Tellier développa la première installation de conservation des aliments, et en 1876 il aménagea un navire et a réussi à transporter de la viande de Buenos Aires à Rouen.
- En 1920 se développe l'utilisation des réfrigérateurs domestiques à grande échelle sous la marque Frigidaire aux Etats Unis et se répand jusqu'en Europe.

Au départ le fluide frigorigène utilisé était l'éther éthylique, est apparu alors d'autres fluides ; l'éther di-méthyle était utilisé par le Charles Tellier, le dioxyde de carbone CO₂ par Thaddeus Lowe ; l'ammoniac NH₃ est expérimenté d'abord par Tellier, puis utilisé par David Boyle et Carl Von Linde, le dioxyde de soufre SO₂ par Raoul Pierre Pictet, le chlorure de méthyle (chlorométhane) CH₃Cl, utilisé pour la première fois par C. Vincent en 1878.

Une équipe américaine de Frigidaire Corporation s'est inspiré des travaux de Swarts a alors utilisé les hydrocarbures fluorés et a mis au point en 1930 la production des premiers frigorigènes fluorés ; sont apparus successivement le premier CFC, le R12 (CF₂Cl₂) en 1931, puis le premier HCFC, le R22 (CHF₂Cl), en 1934 et, en 1961, le premier mélange azéotropique R502 (R22/R115).

1.2 Cycle de Carnot

Une machine frigorifique est un équipement qui permet d'extraire de la chaleur d'un espace moins chaud que l'environnement ; le même équipement peut ajouter de la chaleur à un espace plus chaud que l'environnement, il s'agit alors d'une pompe à chaleur.

Il existe plusieurs processus permettant d'obtenir la réfrigération, le plus répandu est le cycle de compression de vapeur, le cycle d'absorption de la vapeur est fréquemment utilisé lorsqu'une source de chaleur économique est disponible, les systèmes à jets de vapeur sont également utilisés ; les cycles frigorifiques à air permettent d'obtenir des températures très basses.

Le cycle de compression de vapeur est un procédé de réfrigération mécanique, est considéré comme un cycle thermique inversé, en effet la figure 1 montre l'extraction de la chaleur Q_F d'un corps froid maintenu à une température T_F , de même une quantité chaleur Q_C est injectée à un corps chaud maintenu à une température T_C , le procédé nécessite alors un travail W .

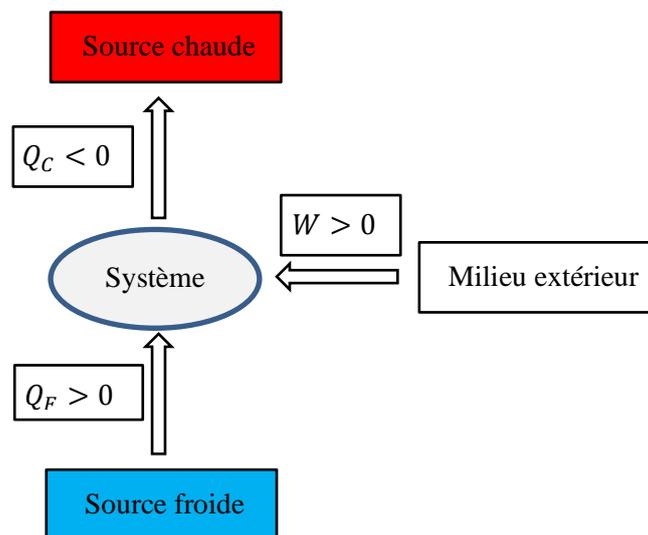


Figure 1 – Schéma d'une installation frigorifique

Le cycle de Carnot est un cycle thermodynamique théorique constitué de quatre transformations, deux isothermes réversibles et deux adiabatiques réversibles donc isentropiques, le chemin parcouru est le sens trigonométrique ; il est considéré comme le moyen le plus efficace de transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude en consommant du travail.

Les machines frigorifiques et les pompes à chaleur reçoivent de la chaleur de la source froide et du travail du milieu extérieur et donnent le tout sous forme de chaleur à la source chaude.

Le cycle frigorifique de Carnot est représenté dans un diagramme (T, S) par un rectangle, comme indiqué dans la figure 2, il est constitué de quatre transformations successives :

- DC : détente isotherme, la chaleur passe de l'espace froid au fluide
- CB : compression adiabatique
- BA : compression isotherme, la chaleur passe du fluide à l'espace chaud
- AD : détente adiabatique

Avec

- Q_F : Quantité de chaleur extraite de la source froide (Positive, en J)
- Q_C : Quantité de chaleur injectée dans la source chaude (Négative, en J)
- W : travail nécessaire pour la transformation (Positif en J)
- T_F : Température de la source froide constante (en K)
- T_C : Température de la source chaude constante (en K)

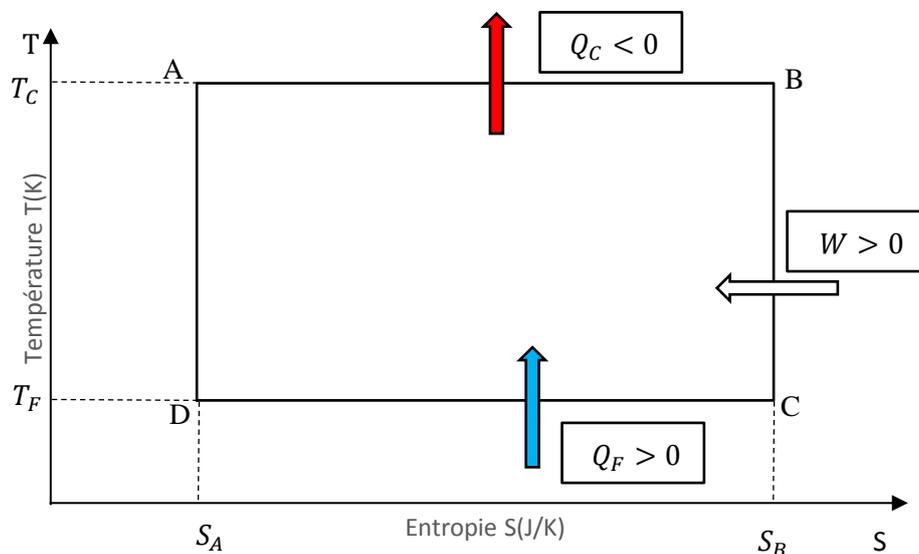


Figure 2 – Cycle de Carnot

1.3 Efficacité d'un cycle de Carnot

Le cycle de Carnot étant un cycle théorique, de ce fait plusieurs systèmes thermodynamiques définissent une efficacité à partir du cycle de Carnot.

La performance d'un système étant défini par le rapport de l'énergie utile récupérée en entrée à l'énergie fournie en sortie à ce système, le coefficient de performance (COP) est défini par :

$$COP = \frac{\text{Energie utile en Sortie}}{\text{Energie fournie en Entrée}} \quad (1-1)$$

1.4 Le COP d'une machine frigorifique

Pour une machine frigorifique, la performance est le rapport de la chaleur extraite de la source froide Q_F rapportée au travail fourni en général sous forme d'énergie électrique W , ce qui donne :

$$COP = \frac{Q_F}{W} \quad (1-2)$$

Sachant que

$$\Delta U = W + Q \quad (1-3)$$

Pour un cycle fermé

$$\Delta U = 0 \quad (1-4)$$

Ce qui donne pour le cas d'un cycle fermé

$$W = -(Q_F + Q_C) \quad (1-5)$$

On remplace, et on obtient

$$COP = \frac{Q_F}{-Q_F - Q_C} \quad (1-6)$$

avec $Q_F > 0$ et $W > 0$, On a

$$COP = \frac{Q_F}{-Q_F - Q_C} = \frac{1}{-1 - \frac{Q_C}{Q_F}} \quad (1-7)$$

L'efficacité maximale est obtenue pour

$$\frac{Q_C}{Q_F} = -\frac{T_C}{T_F} \quad (1-8)$$

Après transformation, on a

$$COP = \frac{1}{-1 - \frac{Q_C}{Q_F}} = \frac{1}{\frac{T_C}{T_F} - 1} = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad (1-9)$$

Ce qui donne finalement le coefficient de performance pour une machine frigorifique est :

$$COP = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad (1-10)$$

1.5 Le COP d'une pompe à chaleur

Dans une pompe à chaleur, on s'intéresse à la chaleur injectée dans la source chaude, avec $Q_C < 0$ et $W > 0$, on définit le COP par :

$$COP = \frac{-Q_C}{W} \quad (1-11)$$

Ce qui donne

$$COP = \frac{-Q_C}{-Q_F - Q_C} = \frac{1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} \quad (1-12)$$

L'efficacité maximale est obtenue pour

$$\frac{Q_C}{Q_F} = -\frac{T_F}{T_C} \quad (1-13)$$

Après transformation, on a

$$COP = \frac{1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} = \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C}} = \frac{T_C}{T_C - T_F} \quad (1-14)$$

Ce qui donne finalement le coefficient de performance pour une pompe à chaleur est :

$$COP = \frac{T_C}{T_C - T_F} \quad (1-15)$$

Dans tous les cas le coefficient de performance est supérieur à l'unité, et devient important lorsque les températures des sources chaude et froide sont proches.

1.6 Rendement du cycle

En réalité le travail nécessaire pour accomplir les opérations de compression sont toujours accompagnés d'irréversibilités, et le coefficient de performance obtenu est inférieur à celui idéal (Carnot) ; on définit alors le rendement du cycle, comme étant le rapport entre le COP réel et celui de Carnot

$$\varepsilon = \frac{COP_{réel}}{COP_{Carnot}} \quad (1-16)$$

1.7 Exercices

Exercice 1 :

on veut maintenir une source froide d'une machine frigorifique à $T_F = 255K$, la source chaude de l'atmosphère est de $T_C = 300K$.

Correction :

On calcule le COP d'une machine frigorifique et on obtient :

$$COP = \frac{T_F}{T_C - T_F} = \frac{255}{300 - 255} = 5,67$$

On retire 5,67 Joules de chaleur de la source froide pour un travail fourni de 1 Joule.

Exercice 2 :

Si la température extérieure est de $T_F = 260K$, on veut maintenir l'intérieur d'une pièce à $T_C = 290K$ avec une pompe à chaleur.

Correction :

On calcule le COP d'une pompe à chaleur et on obtient

$$COP = \frac{T_C}{T_C - T_F} = \frac{290}{290 - 260} = 9,67$$

On récupère 9,67 Joules de chaleur injecté dans la source chaude pour un travail fourni de 1 Joule.

Exercice 3 :

Un réfrigérateur idéal fonctionne dans une pièce où la température est de 20°C et consomme une puissance de 0,75 kW, on veut maintenir le réfrigérateur à 5°C, quel est la quantité de chaleur à extraire en une minute.

Correction :

On calcule le coefficient de performance, qui donne :

$$COP = \frac{T_F}{T_C - T_F} = \frac{(5 + 273)}{(20 + 273) - (5 + 273)} = 18,5$$

Et la quantité de chaleur vaut :

$$\dot{Q}_F = COP \cdot \dot{W} = 18,5 \cdot 0,75 = 13,88 kW = 832,8 kJ/mn$$

Exercice 4 :

Un réfrigérateur Carnot fonctionne dans une pièce où la température est de 25°C. Le réfrigérateur consomme 500 W de puissance en fonctionnement, et a un COP de 4,5. Déterminer :

- La quantité de chaleur à extraire de l'espace réfrigéré
- La température de l'espace réfrigéré

Correction :

La chaleur à extraire de l'espace réfrigéré est :

$$\dot{Q}_F = COP \cdot \dot{W} = 4,5 \cdot 0,5 = 2,25 kW$$

Sachant que le COP est déterminé par

$$COP = \frac{T_F}{T_C - T_F}, \text{ on tire } T_F = \frac{COP \cdot T_C}{COP + 1}$$

Le résultat est :

$$T_F = \frac{4,5 \cdot (25 + 273)}{4,5 + 1} = 243,82 K = -29,2^\circ C$$

Exercice 5 :

Un système de climatisation idéal permet de transférer la quantité de chaleur d'une maison de 75 kJ/s pour maintenir sa température à 22°C. Si à l'extérieur la température de l'air est de 32°C, déterminez la puissance requise faire fonctionner ce système de climatisation.

Correction :

Le COP d'un climatiseur est :

$$COP = \frac{T_F}{T_C - T_F} = \frac{(22 + 273)}{(32 + 273) - (22 + 273)} = 29,5$$

La puissance absorbée par le système de climatisation est :

$$\dot{W} = \frac{\dot{Q}_F}{COP} = \frac{75}{29,5} = 2,54kW$$