

Chapitre 3 : Diagramme Enthalpique

I- LE CYCLE FRIGORIFIQUE

I.1 Le cycle frigorifique de référence

Le cycle frigorifique d'une machine frigorifique est habituellement représenté dans le diagramme thermodynamique enthalpie (h) - pression (Log P) appelé diagramme enthalpique ou diagramme de Mollier des frigoristes.

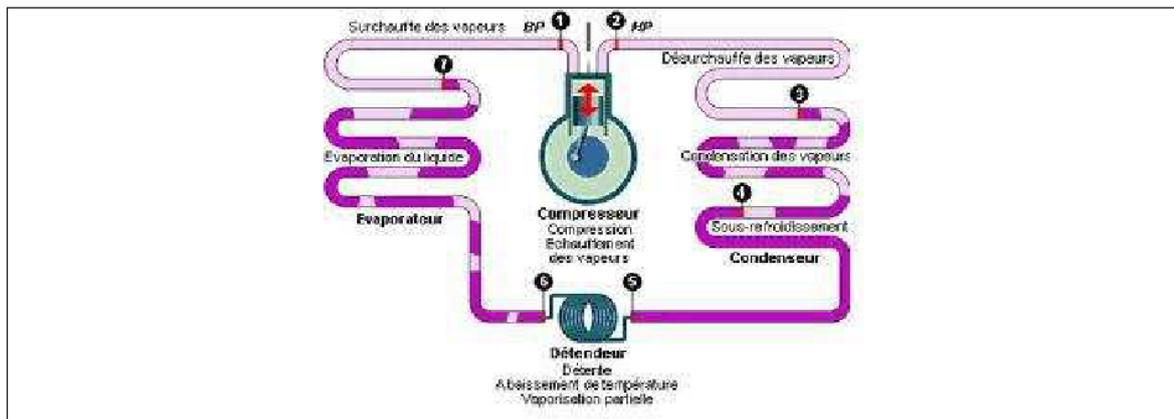


Figure 7.0 : Schéma de la machine frigorifique de base.

Suivant le schéma de la machine frigorifique de la figure 7.0, le fluide frigorigène (FF) circulant dans le circuit frigorifique suit les évolutions suivantes :

entre 1 et 2 : compression des vapeurs de FF qui passent d'un niveau de basse pression (BP) à un niveau de haute pression (HP)

entre 2 et 3 : désurchauffe des vapeurs de FF HP

entre 3 et 4 : condensation des vapeurs de FF HP qui deviennent du FF liquide HP

entre 4 et 5 : sous refroidissement du FF liquide HP

entre 5 et 6 : détente du FF liquide HP qui devient un mélange de liquide BP et d'une faible quantité de vapeurs BP

entre 6 et 7 : évaporation du FF liquide BP qui devient des vapeurs de FF BP

entre 7 et 1 : surchauffe des vapeurs de FF BP

Les différentes évolutions du FF de la machine frigorifique sont représentées sur le diagramme enthalpique, il s'agit du cycle frigorifique de la machine communément appelée cycle de référence ou cycle pratique par les frigoristes.

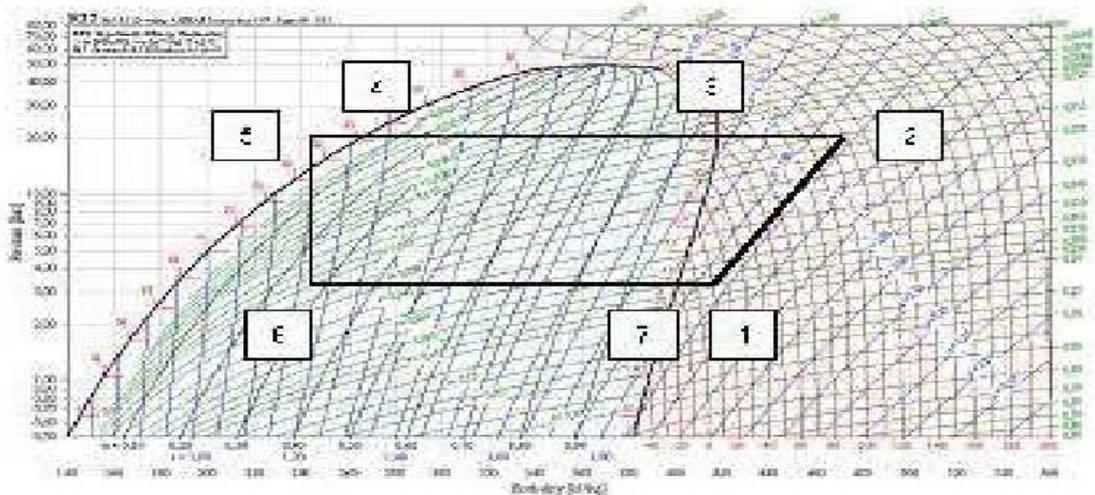


Figure 7.1 : cycle frigorifique de référence.

Le cycle frigorifique de référence (cycle pratique) est un compromis qui permet d'effectuer l'étude et le dimensionnement des machines frigorifiques avec une précision acceptable.

En pratique, ce cycle est tracé sur les bases suivantes :

compression isentropique

détente isenthalpe

surchauffe de 5°C (pour étude de conception) ou SH mesurée

sous-refroidissement de 5°C (pour étude de conception) ou SR mesuré

Le cycle frigorifique de référence (cycle pratique) permet de s'affranchir des cycles frigorifiques proposées par la théorie de la thermodynamique appliquée à savoir :

le cycle théorique

le cycle parfait

le cycle réel.

Néanmoins, ces cycles présentent un grand intérêt pour l'étude théorique des systèmes thermodynamiques.

I.2 Le cycle théorique

Ce cycle qui est représenté par le diagramme 1-2-3-4 (cf. figure 7.2) est établi sur la base suivante :

pas de perte de charges dans les tubulures

pas de SH au niveau de l'évaporateur

pas de SR au niveau du condenseur.

Les transformations thermodynamiques subies par le FF à l'intérieur de la machine sont les suivantes :

compression isentropique du FF vapeur entre les points 1 et 2

condensation isothermique entre les points 2 et 3

détente isenthalpe entre les points 3 et 4

évaporation isothermique entre les points 4 et 1

I.3 Le cycle parfait

Ce cycle qui est représenté par le diagramme $1'-2'-3'-4'$ (cf. figure 7.2) est établi sur la base suivante :

pas de perte de charges dans les tubulures

SH au niveau de l'évaporateur

SR au niveau du condenseur

Les transformations thermodynamiques subies par le FF à l'intérieur de la machine sont les suivantes :

compression isentropique entre les points $1'$ et $2'$

condensation isothermique entre les points $2'$ et 3

SR du FF à la sortie du condenseur entre les points 3 et $3'$

détente isenthalpe entre les points $3'$ et $4'$

évaporation isothermique entre les points $4'$ et 1

SH du FF à la sortie de l'évaporateur entre les points 1 et $1'$

I.4 Le cycle réel

Ce cycle qui est représenté par le diagramme $1''-2'''-3'-4'$ (cf. figure 7.2) est établi sur la base suivante :

la compression est polytropique, le point $1'$ se translate au point $1''$ (l'intégralité du travail de compression n'est pas transmise au FF à cause des échanges thermiques entre le système et le milieu extérieur)

le point $2'$ devient $2'''$ pour tenir compte :

de l'énergie perdue (notion de rendement indiqué)

des pertes mécaniques

des PDC au refoulement du compresseur

En réalité aucun des trois cycles précités ne sont véritablement utilisés par les frigoristes qui utilise le **cycle frigorifique de référence**.

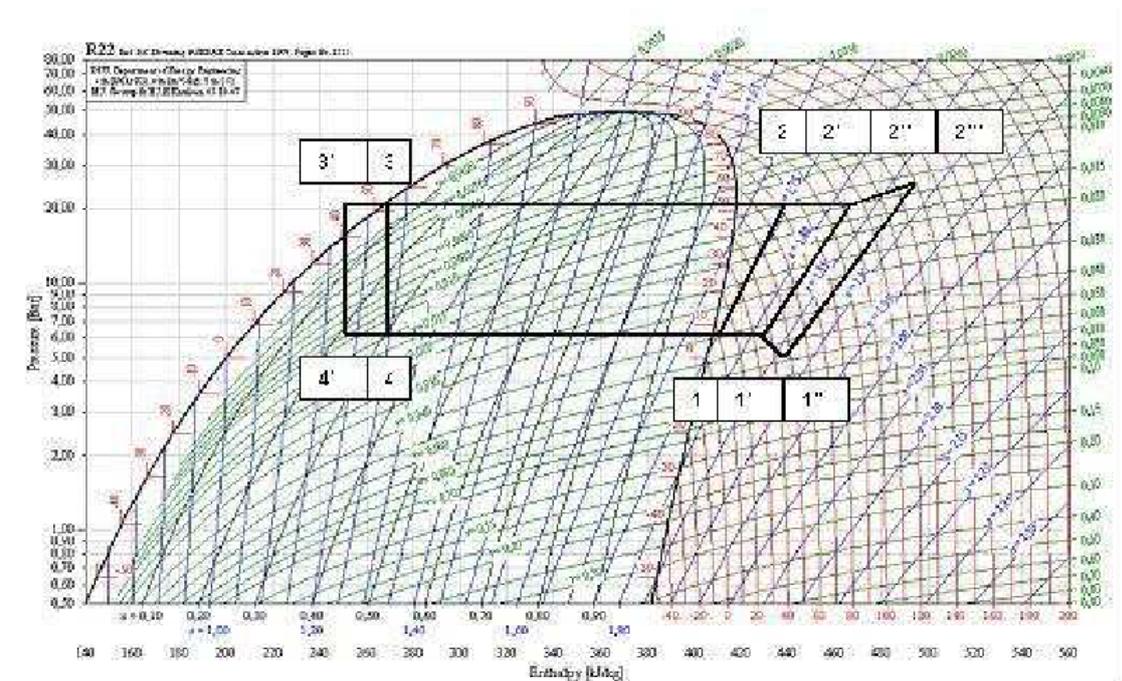


Figure 7.2 : Les cycles frigorifiques.

II LE DIAGRAMME ENTHALPIQUE

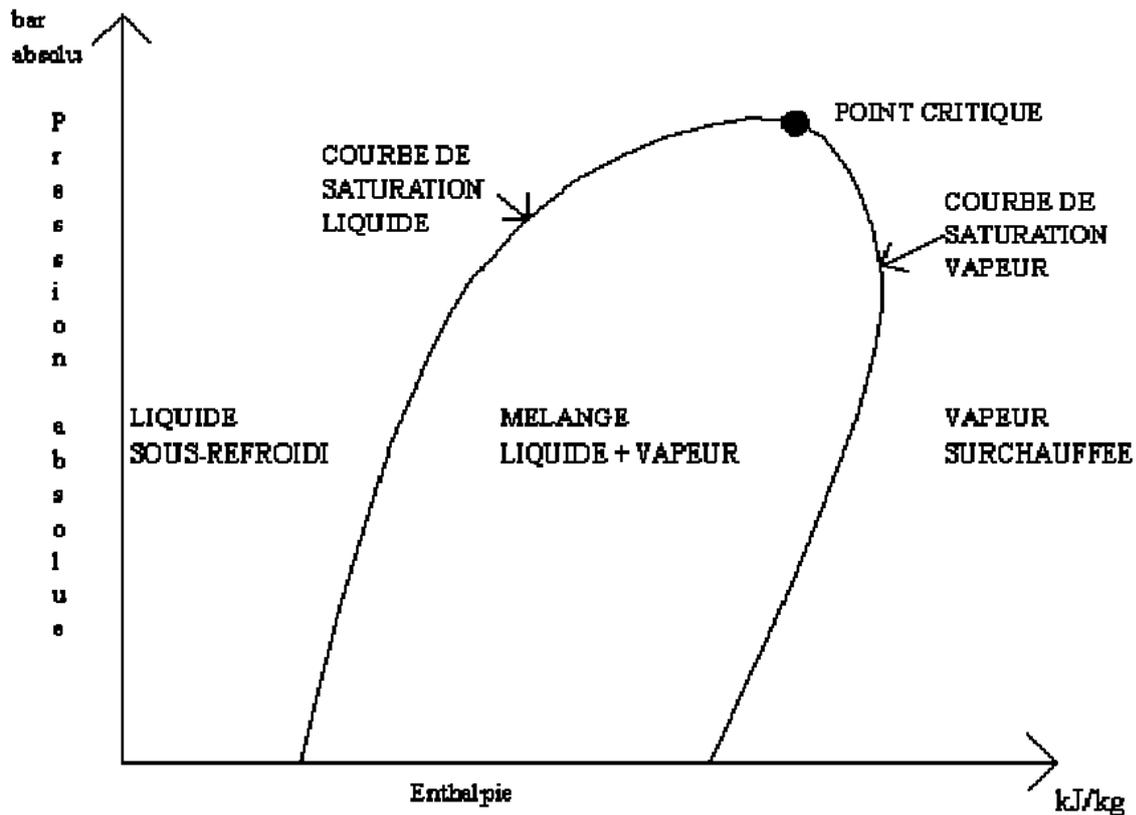
1 Définitions

Le diagramme enthalpique permet de suivre l'évolution de la pression, de la température, de l'enthalpie, de l'entropie, du volume massique, du mélange liquide-vapeur d'un fluide frigorigène dans un système frigorifique.

Il existe un diagramme enthalpique pour chaque fluide frigorigène.

Sur le diagramme enthalpique, on peut suivre les différents changements d'état du fluide.

2 Présentation générale



Le diagramme est délimité en abscisse par l'échelle des enthalpies et en ordonnée par l'échelle des pressions.

Les courbes de saturation se rejoignent au point critique et divisent le diagramme en trois parties :

- zone de liquide sous-refroidi
- zone de mélange liquide +vapeur
- zone de vapeur surchauffée

Ces trois zones correspondent aux différents états du fluide frigorigène dans un système frigorifique.

Au dessus, du point critique un changement d'état n'est plus possible.

3 Evolution des différents paramètres

La pression

L'échelle des pressions évolue parallèlement à l'axe des enthalpies. Une transformation qui s'effectue à pression constante est une transformation ISOBARE.

L'enthalpie

L'échelle des enthalpies évolue parallèlement à l'axe des pressions. L'enthalpie

représente l'énergie totale emmagasinée par 1 kg de fluide frigorigène pour une pression et une température donnée. Une transformation qui s'effectue à enthalpie constante est une transformation ISENTHALPE.

La température

Dans la zone de mélange liquide + vapeur, la température et la pression sont liées (relation Pression / Température). Dans les autres zones la température et la pression ne sont pas liées. Une transformation qui s'effectue à température constante est une transformation ISOTHERME.

Le volume massique

Le volume massique représente le volume occupé par 1 kilogramme de fluide frigorigène. Une transformation qui s'effectue à volume massique constant est une transformation ISOCHORE.

L'entropie

L'entropie représente l'énergie interne emmagasinée par 1 kg de fluide frigorigène et par Kelvin. Une transformation qui s'effectue à entropie constante est une transformation ISENTROPE.

Le titre

Le titre représente le pourcentage de vapeur par rapport au liquide. Si le titre reste constant, on parle de ISOTITRE.

4 Utilisation du diagramme enthalpique

Un système frigorifique se définit toujours par rapport à ces températures de fonctionnement.

La température de

condensation qui dépend de la température du médium de condensation de l'air ou de l'eau. La température

d'évaporation qui dépend de la température de conservation et de l'humidité relative.

Détermination de la température de condensation

La température de l'air extérieur est de + 20 °C

Le Dq total du condenseur est de 10 °C (donnée constructeur issue de la sélection du condenseur).

Il est impératif de choisir un condenseur avec un Dq total le plus faible possible pour avoir une consommation énergétique la plus faible possible.

Pour déterminer la température de condensation (q_k) il suffit d'appliquer la formule suivante :

Température de condensation (q_k) = Température de l'air extérieure + Dq total du condenseur

$$q_k = (+ 20) + 10 = + 30 \text{ °C}$$

Détermination de la température d'évaporation

La température intérieure de la chambre froide est de - 5 °C

L'humidité relative de la chambre froide à maintenir est de 90 % ce qui correspond à un Dq total de 5 °C. Pour la sélection de l'évaporateur, il faudra choisir ce Dq total afin de maintenir la bonne humidité relative.

La température d'évaporation (q_o) sera donc de :

Température d'évaporation (q_0) = Température de la chambre froide - Dq total à l'évaporateur

$$q_0 = (-5) - 5 = -10 \text{ °C}$$

Schéma fluide de l'installation et points caractéristiques

146

La surchauffe des vapeurs à la sortie de l'évaporation

Les vapeurs saturées, en fin d'évaporation, sont surchauffées pour garantir 100 % de vapeurs à l'entrée du compresseur et éviter ainsi des coups de liquide. Cette surchauffe est assurée par le détendeur thermostatique. On l'appelle surchauffe fonctionnelle au détendeur.

La surchauffe est de 5 °C (valeur usuelle généralement mesurée)

La température au point 9 sera donc de :

$$q_9 = q_0 + 5 \text{ °C}$$

$$q_9 = (-10) + 5 = -5 \text{ °C}$$

La surchauffe des vapeurs dans la ligne d'aspiration

Les vapeurs surchauffées sortant de l'évaporateur se dirigent vers le compresseur. Ces vapeurs reçoivent de la chaleur du milieu extérieure.

Donc, la température des vapeurs surchauffées augmente.

La surchauffe des vapeurs dans la ligne d'aspiration est de : 10 °C. Cette valeur correspond à une moyenne généralement relevée sur les installation dont la ligne d'aspiration est calorifugée.

La température au point 1 sera donc de :

$$q_1 = q_9 + 10 \text{ °C}$$

$$q_1 = (-5) + 10 = +5 \text{ °C}$$

Si on additionne la surchauffe fonctionnelle et la surchauffe de la ligne d'aspiration, on trouve la surchauffe totale de la machine frigorifique. (ici surchauffe totale = 15°C)

147

La compression

Pour simplifier, nous supposons la compresseur isentropique, c'est à dire que les vapeurs surchauffées suivent pendant la compression les courbes d'entropie. Le point 2 se situe à l'intersection de la courbe d'entropie et de l'isobare passant par + 30 °C qui correspond à la température de condensation q_k déterminée toute à l'heure.

148

La désurchauffe des vapeurs dans la tuyauterie de refoulement

Les vapeurs surchauffées sortant du compresseur se dirigent vers le condenseur et en contact avec le milieu extérieur les vapeurs subissent une désurchauffe. Cette désurchauffe est importante puisque le refoulement n'est pas calorifugé. Effectivement, avoir une désurchauffe importante dans le refoulement permet d'avoir une zone de désurchauffe dans le condenseur moins importante...

La température au point 3 est de :

$$q_3 = +48 \text{ °C}$$

La condensation

Les vapeurs surchauffées entrent dans le condenseur qui se scinde en trois zones...

La zone de désurchauffe du point 3 vers le point 4.

La zone de condensation du point 4 vers le point 5.

$$q_4 = q_5 = +30 \text{ °C}$$

149

Le sous refroidissement du liquide

La troisième zone du condenseur est la zone de sous refroidissement.

Le sous refroidissement peut être plus ou moins important et il est très utile au fonctionnement du système et permet d'alimenter le détendeur en 100% liquide.

Le sous refroidissement est généralement fixé à 5 °C. Cette valeur permet en effet un fonctionnement correct pour la plus part des systèmes.

$$q_6 = q_5 - 5 \text{ °C}$$

$$q_6 = (+ 30) - 5 = + 25 \text{ °C}$$

Le sous refroidissement dans la ligne liquide

Le liquide sortant du condenseur subit un refroidissement entre la sortie du condenseur et l'entrée du détendeur. La ligne liquide n'est pas calorifugée car ce sousrefroidissement est bénéfique pour le système frigorifique.

le refroidissement généralement relevé est de 5 °C.

La détente

La détente est adiabatique. Donc, l'enthalpie du point 7 est égale à l'enthalpie du point 8. On parle aussi de

détente isenthalpe.

La température au point 8 est de :

$$q_8 = - 10 \text{ °C}$$

L'évaporation

L'évaporation s'effectue du point 8 jusqu'au point 9.