

Avant-propos

Le génie

frigorifique et climatique compte parmi les thématiques les plus importantes du 21^{ème} siècle. Le développement des techniques de refroidissement a rendu possible la conservation des denrées périssables. De même, la production de plastiques hautes performances serait inconcevable sans les possibilités offertes par le refroidissement de processus.

Les méthodes et procédés utilisés pour produire du froid sont appelées génie frigorifique. Les connaissances théoriques du génie frigorifique couvrent l'ensemble du domaine des sciences naturelles. Outre des connaissances approfondies en thermodynamique, des connaissances complémentaires en génie mécanique, transfert de chaleur, chimie, génie des procédés thermiques, construction d'appareils et technique de mesure et de régulation sont nécessaires

Du point de vue physique, le froid c'est une notion qui reste compliquée à expliquer. Le froid n'est ni une matière, ni une forme d'énergie. Pour faire simple, on peut dire que le "froid" correspond au manque de "chaud". Lorsque l'on parle de "froid", la température à un endroit est alors inférieure à celle de l'environnement, on est en présence d'un différentiel de température.

D'un point de vue thermodynamique, le "froid" est un état de déséquilibre. En présence d'un état de déséquilibre thermodynamique, la nature s'efforce toujours de le compenser. Conformément au deuxième principe de la thermodynamique, cette compensation s'effectue toujours de l'endroit dont la température est élevée vers l'endroit où la température est faible.

Le génie frigorifique consiste à concevoir des solutions techniques pour générer des températures inférieures à la température ambiante. La chaleur doit donc être transportée dans la direction opposée à celle qu'elle prend naturellement. Pour générer et maintenir ce flux d'énergie, le cycle frigorifique doit être alimenté en permanence en énergie.

Le génie frigorifique possède un grand nombre d'applications dans et d'installations, ainsi que dans de nombreuses autres spécialités. Étant donné la grande variété des applications, les techniques varient elles aussi fortement,

Ce document est destiné aux étudiants de 3^{ème} année de licences techniques, et particulièrement aux étudiants de Génie Mécanique, option Energétique. L'objectif essentiel de ce cours est proposé d'aborder le principe de machines frigorifiques à compression ou à absorption et de sensibiliser l'étudiant à la notion du froid avec ses différentes méthodes de production notamment le froid industriel (Artificiel) et ses domaines d'application..., L'étudiant doit prendre connaissance des principes techniques actuelles utilisées et leurs spécifications, la construction de machines fait l'un des objectifs visés de ce document avec une simple étude de bilan énergétique d'une installation frigorifique. L'analyse qui en résulte se base sur l'étude des cycles thermodynamiques dans différents diagrammes.

Machine frigorifique & Pompe à chaleur

3^{eme} Année LICENCE

Mécanique Energétique

Préparé par

Dr. LITOUCHE Billel

CHAPITRE 1

Généralités

<i>Sommaire</i>	<i>page</i>
I. Historique du froid	6
I.1. Introduction	6
I.2. Production du froid	6
I.2.1. Procédés traditionnels :	6
I.2.2. Production de froid Artificiel	7
II. Cycle frigorifique de Carnot	8
II.1. Présentation du cycle de Carnot	10
II.2. Coefficient de performance du cycle de Carnot	10
II.3. Rendement d'une installation frigorifique	11
Exercices. (Série TD 01)	13

I. Historique du froid

I.1. Introduction :

L'Homme des pays tempérés constaté que les aliments (les denrées) ***périssables*** pouvaient être conservées dans l'hiver que l'été. Et pour cela l'Homme a longtemps cherché à reproduire les températures hivernales afin de préserver ses denrées même en été.

L'utilisation du « froid naturel » s'est faite très tôt et aussi très longtemps puisqu'au début du 20^{ème} siècle le marché de la glace naturelle était encore plus important que celui de la glace artificielle

La production du froid qui consiste à absorber la chaleur contenue dans un milieu peut être obtenue suivant plusieurs modes. De même, les applications du froid sont très variées.

Le froid trouve de nombreuses applications dans des domaines très variées (industries agroalimentaires, médecine, confort thermique, pétrochimie...) et c'est dans le domaine alimentaire que le froid occupe une place prépondérante, Pour les produits fabriqués par l'industrie agroalimentaire (lait, fromage...), le froid permet d'améliorer leur qualité en favorisant la maîtrise des conditions de fabrication par une optimisation des paramètres climatiques influençant le comportement des microorganismes, L'utilisation des atmosphères artificielles permet d'augmenter la durée de conservation de certains fruits et légumes.....

I.2. Production de froid

Parmi les différentes modes de production du froid, on trouve

1.2.1. Procédés traditionnels :

Autres que le froid, de conservation des aliments ont été nombreux comme le salage, le saumurage, le séchage et le fumage

- *Le salage* : *Technique consistant à saler un aliment (viande, fromage, etc.) pour le conserver ou bien consiste à envelopper la denrée avec du gros sel*
- *Le saumurage* : *liquide à forte concentration de sel dans lequel on conserve les viandes.*
- *Le séchage* *est une méthode de conservation des aliments par déshydratation. Il permet de ralentir la progression des bactéries.*

- Le fumage : est une méthode de conservation des aliments. Il suffit d'exposer la viande ou le poisson à une grande quantité de fumée pour leur donner une saveur unique.
- Glace naturelle : La glace produite naturellement, était :
 - Soit, de façon permanente, de régions froides et transportée sur de longues distances.
 - Soit, de manière discontinue, des pièces d'eau des régions tempérées gelées par le froid hivernal. Il était nécessaire de conserver cette glace dans les « glaciers » dont les parois devaient être thermiquement isolantes.

1.2.2. Production de froid Artificiel

➤ Mélange des Liquides

Le mélange de certains sels dans l'eau abaissait notablement la température de la solution ainsi obtenue.

- Le premier à avoir évoqué l'usage, en Inde, au 4^{ème} siècle, de tels mélanges semble être l'écrivain arabe Ibn Abi USAIBIA.
- L'usage du refroidissement de l'eau par l'emploi du **salpêtre** est cité par le médecin italien ZIMARA en (1530).
- Ensuite la découverte que le mélange de neige et de sels par TANCREDO (1607) permettait d'atteindre des températures encore plus basses

➤ Divers systèmes frigorifiques

Nous distinguerons deux grandes classes de systèmes frigorifiques : ceux qui consomment, pour fonctionner, de l'énergie mécanique, les systèmes *mécano-frigorifiques*, et ceux qui consomment essentiellement de l'énergie thermique, les systèmes *thermo-frigorifiques*.

✓ Systèmes mécano-frigorifiques

Parmi eux, deux familles se détachent :

- Les systèmes à compression de vapeurs
- Les systèmes utilisant des cycles à gaz.

a- *Systèmes à compression de vapeur :*

Une première *description* du cycle a été donnée en 1805 par l'américain Oliver Evans, Mais c'est à l'américain Jacob Perkins qui développe le premier modèle de la machine à compression de vapeur fonctionnant à l'éthylque. (1835), La première machine à compression qui a un succès industriel est celle fabriquée par James Harrison (1855) en Australie.

b- *Systèmes utilisant des cycles à gaz :*

Comme les turbines à gaz, turbines à combinées,

✓ *Systèmes thermo-frigorifiques*

On distingue, parmi ces systèmes frigorifiques consommant de l'énergie thermique :

a- Systèmes à adsorption et les systèmes à éjection.

b- Systèmes à absorption.

Bien que leur importance soit beaucoup plus réduite que celle des systèmes à compression, ce sont, actuellement, les seuls systèmes thermo-frigorifiques qui connaissent un certain développement. En 1859 la première machine à absorption continue utilisant le couple : Frigorigène : *Ammoniac* – absorbant : *Eau*.

II. Cycle frigorifique de Carnot (Cycle Diathermes)

II.1. Présentation du cycle de Carnot

Le cycle de Carnot est composé de deux isothermes et de deux adiabatiques.

- *Cycle diathermes*
- *Agent de transformation : fluide gaz parfait*
- *Deux isothermes réversibles*
- *Deux adiabatiques réversibles*

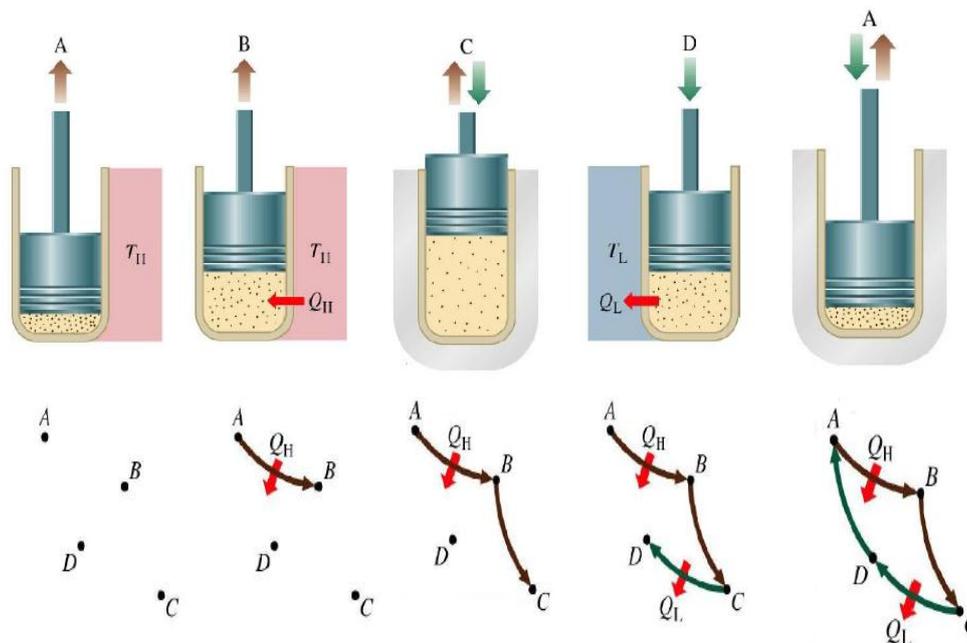


Figure 1.1. Différentes étapes du cycle de Carnot

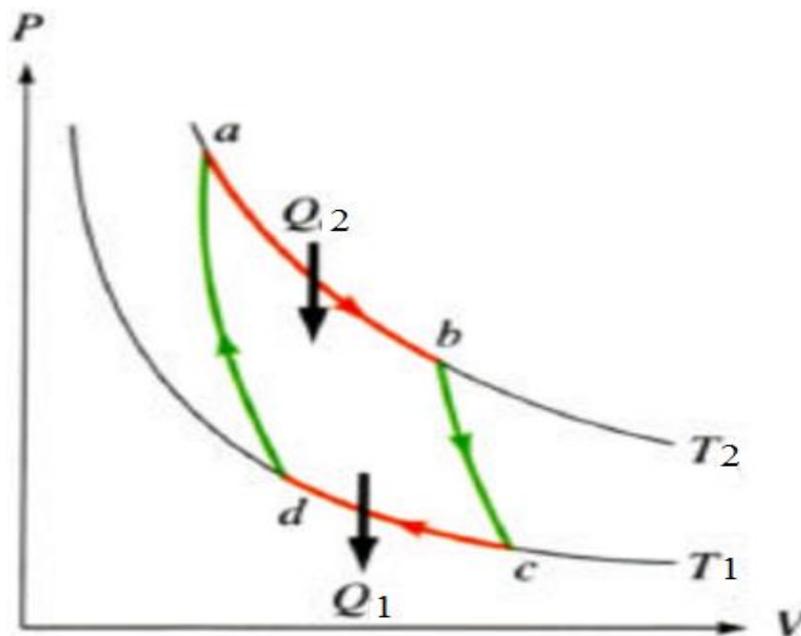


Figure 2.1. Présentation du cycle de Carnot sur le Diagramme P-V (Clapeyron)

✓ Le système part du point **a**, à la température T_2 , Le gaz est soumis à une **détente isotherme** de **a** à **b**. Durant ce processus, l'énergie interne du gaz parfait, qui dépend uniquement de sa température, ne varie pas. Le gaz absorbe une quantité de chaleur (Q_2).

✓ On isole thermiquement le système au milieu extérieur. Le gaz est soumis à une **détente adiabatique** ($Q = 0$) de **b** à **c** jusqu'à la température T_1 , le travail effectué un positif W_{bc} .

✓ Le gaz subit une **compression isotherme** de (c) à (d) à température constante T_1 et cède une quantité de chaleur (Q_1).

✓ La dernière étape est une **compression adiabatique** de (d) à (a) durant laquelle la température monte jusqu'à T_2 . Le travail adiabatique effectué par le gaz est égal à l'opposé du travail de l'étape 2, c'est-à-dire $W_{da} = -W_{bc}$.

La partie ABC représente la détente : c'est la course motrice, car le gaz effectue un travail positif sur le milieu extérieur. Sur la partie CDA du cycle le gaz rejette une quantité de chaleur et le milieu extérieur effectue un travail sur lui

II.2. Coefficient de performance du cycle de Carnot

Notons que

Q_1 : Chaleur cédée par le fluide au cours d'un cycle.

Q_2 : Chaleur absorbée par le fluide au cours d'un cycle.

On applique :

1^{ER} principe de la thermodynamique :

$$\Delta U_{cycle} = 0 \implies \Delta U_{cycle} = W + Q_1 + Q_2 = 0$$

$$W = -(Q_1 + Q_2)$$

2^{EME} principe de la thermodynamique :

$$\Delta S_{cycle} = 0 \implies \Delta S_2 + \Delta S_1 = 0 \implies \Delta S_2 = -\Delta S_1$$

$$\Delta S_1 = S_d - S_c \quad \& \quad \Delta S_2 = S_b - S_a$$

$$Q_1 = T_1 (S_d - S_c) \quad \& \quad Q_2 = T_2 (S_b - S_a)$$

$$\Delta S_1 = (S_d - S_c) = \frac{Q_1}{T_1} \quad \& \quad \Delta S_2 = (S_b - S_a) = \frac{Q_2}{T_2}$$

$$\frac{Q_2}{T_2} = -\frac{Q_1}{T_1}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = -\frac{T_1}{T_2}$$

➤ *Formule de rendement*

$$\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie fournie}}$$

➤ Rendement de Carnot

Pour un moteur thermique, l'énergie utile est le travail effectué et l'énergie fournie est la chaleur prise à la source chaude. Ainsi pour un cycle

$$\eta_{car} = \frac{\text{Travail effectué}}{\text{Chaleur source chaude.}}$$

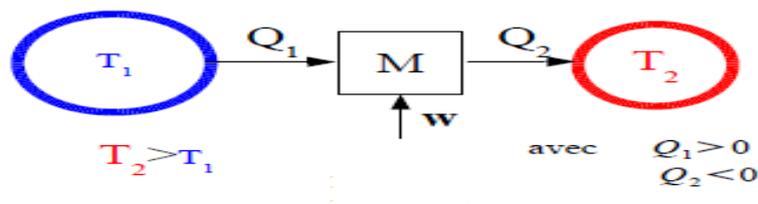
$$\text{Soit : } S_a = S_d \quad \& \quad S_b = S_c$$

$$\eta = \frac{-W}{Q_2} = \frac{(Q_2 + Q_1)}{Q_2} = \frac{[T_2 (S_b - S_a) + T_1 (S_d - S_c)]}{T_2 (S_b - S_a)} = 1 + \frac{T_1 (S_d - S_c)}{T_2 (S_b - S_a)}$$

$$= 1 + \frac{T_1 (S_a - S_b)}{T_2 (S_b - S_a)} = 1 - \frac{T_1 (S_b - S_a)}{T_2 (S_b - S_a)}$$

$$\eta_{car} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

II.3. Rendement d'une Installation frigorifique



Le principe de réfrigérateur d'absorber la chaleur d'une source froide pour refroidir le milieu, et le rendement donné par :

$$\eta_{IF} = \frac{\text{Chaleur source froide}}{\text{Travail effectué}}$$

$$\eta_{IF} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{-(Q_1 + Q_2)} = \frac{T_1 (S_d - S_c)}{T_2 (S_d - S_c) - T_1 (S_d - S_c)}$$

$$\eta_{IF} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

➤ **Rendement d'une Pompe à chaleur**

Même principe que le réfrigérateur mais avec un but différent : prendre de la chaleur d'une source froide pour chauffer un milieu.

$$\eta_{PAC} = \frac{\text{Chaleur source chaude}}{\text{Travail effectué}}$$

$$\eta_{PAC} = -\frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

➤ **Machines Motrice et Réceptrice**

Schéma de principe d'une machine Motrice	Schéma de principe d'une PAC/ INF (Réceptrice)
<p>Tc : température de la source chaude. Tf : température de la source froide. W : Travail du cycle Qc : Chaleur de la source chaude. Qf : Chaleur de la source froide. Système : fluide</p>	

Série de TD 01

Chapitre 01

Exercice 1

Soit une machine thermique fonctionnant entre deux sources de chaleur T_c et T_f ($T_c > T_f$).

- 1) Faites les schémas de principe et précisez les signes des travaux et des quantités de chaleur dans le cas où cette machine fonctionne comme :
 - Une machine motrice
 - Une pompe à chaleur

- 2) Définir puis exprimer en fonction de T_c et T_f
 - Le rendement maximal de la machine motrice
 - L'efficacité maximale de la pompe à chaleur

Exercice 2

Une installation thermique réversible fonctionne entre deux masses d'eau (capacité thermique $C_p = 4185 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) :

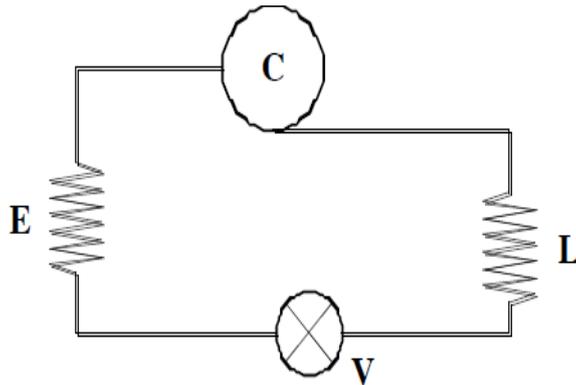
- Une masse d'eau $m_c = 500 \text{ kg}$, source chaude à la température initiale $T_{c,0} = 360 \text{ K}$,

- Une masse d'eau $m_f = 800 \text{ kg}$, source froide à la température initiale $T_{f,0} = 288 \text{ K}$.

- 1/ Calculez la température finale, T , atteinte lorsque le moteur cesse de fonctionner.
- 2/ Déterminer la variation de l'entropie ΔS_1 , le transfert thermique Q_c reçu par la source chaude.
- 3/ Déterminer la variation de l'entropie ΔS_2 , le transfert thermique Q_f fourni à la source froide.

Exercice 3

Une machine thermique est utilisée pour assurer le chauffage en hiver et le refroidissement en été d'une maison. Donc, cette machine thermique joue le rôle d'une pompe à chaleur en *hiver* et d'un climatiseur en *été* (voir la figure ci-dessous). Le fluide moteur est le *fréon*. Ce fluide est comprimé par un compresseur (C) et se condense dans un condenseur (L). Puis il subit une détente au niveau d'une valve (V) et finit de se vaporiser dans l'évaporateur (E) avant de retourner dans le compresseur.



Questions

1/ Dans telle machine thermique, lequel des deux organes L ou E faut-il mettre en contact avec la source chaude et la source froide ?

2/ En *hiver* la température extérieure est de 5 °C et la température intérieure (dans la maison) est maintenue à 20 °C.

- a- Calculez la quantité de chaleur maximale qui peut fournir 1kg de l'air à la maison au bout d'une heure si la capacité thermique de l'air $C_p = 1 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, en utilisant $Q = mC_p\Delta T$
- b- En déduire le coefficient de performance maximal du récepteur thermique.

3/ En *été*, la température extérieure est de 45 °C et la température intérieure est maintenue à 20 °C.

- a- Quel est le coefficient de performance maximal du récepteur thermique ?
- b- Comparez-les avec celui du circuit de Carnot

CHAPITRE 2

Cycle Thermodynamique D'une Machine Frigorifique À Compression De vapeur

Sommaire	Page
I. Introduction	17
II. Rappel sur les diagrammes (T, S) et (P, h)	17
II.1. Diagramme (T, S)	18
II.2 Diagramme (P, h)	18
III. Machine frigorifique à compression mécanique de vapeur	19
III.1. Composition de la machine à compression de vapeur	19
III.2. Fonctionnement d'une machine frigorifique à compression	20
IV. Représentation du cycle thermodynamique	21
IV.1. Cycle de référence (base) sur Diags (T, S), (P, h)	21
IV.2. Cycle pratique sur Diags (T, S), (P, h)	23
V. Bilan thermique du cycle frigorifique	28
V.1. Puissance de chaque composant	28
V.2. Coefficient de performance	29
VI. Application du froid	29
VII. Notion de Fluides frigorigènes	30
Exercices (Série TD 02 & 03)	32

I. Introduction

La chaleur ne peut pas passer spontanément d'un corps froid vers un corps chaud. Si l'on veut effectuer le transfert de chaleur, dans le sens antinaturel, *d'un milieu froid vers un milieu chaud*, il faut, nécessairement, d'une part, mettre en œuvre un système thermique particulier, et, d'autre part, fournir de l'énergie au système.

Le système thermodynamique particulier mis en œuvre est susceptible de transférer effectivement de la chaleur d'un milieu à température inférieure où la chaleur est prélevée (source froide) vers un milieu à température supérieure où la chaleur est rejetée (source chaude). Lorsque le but recherché est l'extraction de chaleur à un corps, ou à un milieu, pour le refroidir ou le maintenir à une température inférieure à celle de l'ambiance, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de ***produire du froid***, le système thermodynamique qui effectue cette opération prend naturellement le nom de ***machine frigorifique***. L'effet utile est la chaleur extraite (ou le froid produit) à la source froide

Machines à compression on les distingue selon leurs mode d'utilisation

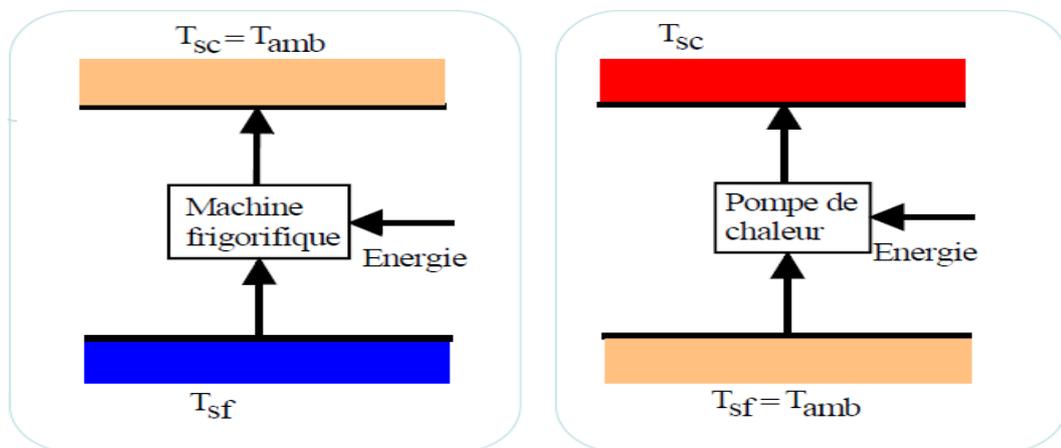


Figure 2.1. Mode d'utilisation

II. Rappel sur les diagrammes (T, S) et (P, h)

Dans les installations frigorifiques et celle des pompes à chaleur, on utilise deux types de diagrammes généralement :

- Le diagramme (T, S) Température-Entropie
- Le diagramme (P, h) Logarithme de la pression-Enthalpie

II.1. Diagramme (T, S)

Les courbes iso-paramétriques de la figure (2.2) du diagramme (T, S) présentent certaines particularités, que sont :

- Les isothermes sont horizontales
- Les adiabatiques réversibles (isentropiques) sont verticales
- Les adiabatiques irréversibles sont des courbes inclinés dans le sens des entropies croissantes
- Les isochores change de direction à la courbe de saturation
- Le cycle de Carnot est représenté par un rectangle
- L'aire en dessous de la courbe représente la quantité de chaleur échangée
- L'aire d'un cycle fermé représente le travail fourni

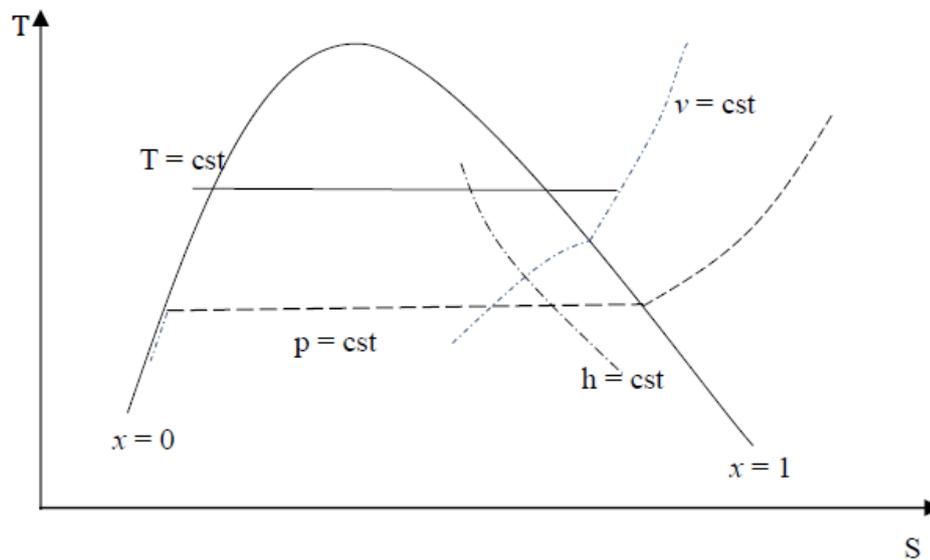


Figure 2.2. Diagramme entropie

II.2. Diagramme (P, h)

Les courbes iso-paramétriques de la figure (2.3) du diagramme (P, h) présentent certaines particularités, que sont :

- Les isobares sont horizontales
- Les isenthalpiques sont verticales
- Les isothermes sont pratiquement verticales dans la zone liquide, horizontales dans la zone de mélange et décroissantes dans la zone de vapeur
- Les isochores sont croissantes avec un changement de direction à la courbe de saturation

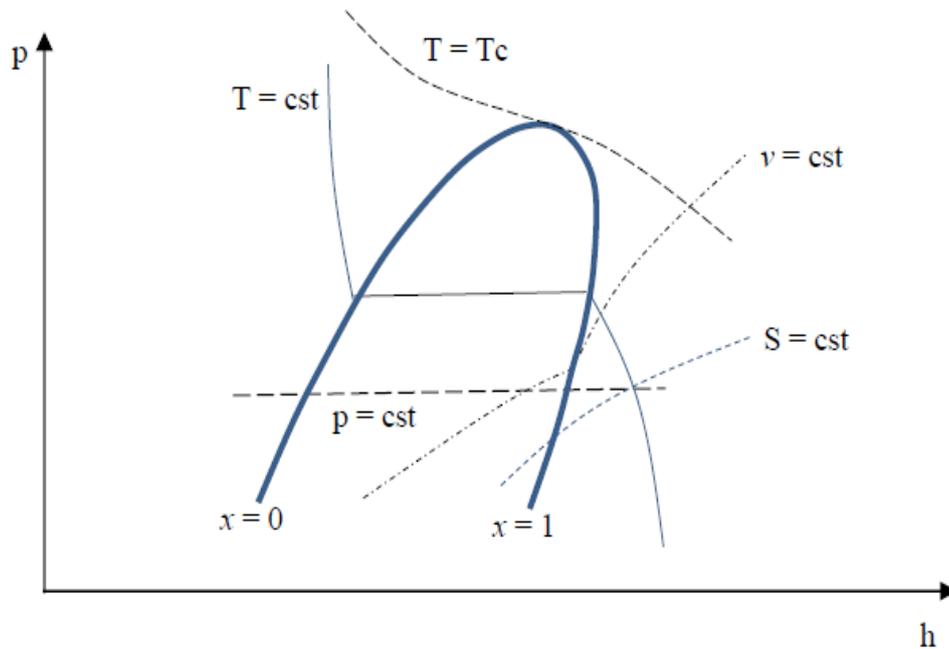


Figure 2.3. Diagramme Enthalpique

III. Machine frigorifique à compression mécanique de vapeur

Les installations frigorifiques à compression sont les systèmes frigorifiques les plus courants dans la pratique. Dans une installation frigorifique à compression, un agent réfrigérant traverse le circuit frigorifique, et y subit différentes transformations d'état. L'installation frigorifique à compression est basée sur l'effet physique selon lequel de l'énergie thermique est nécessaire pour le passage de l'état liquide à l'état gazeux.

- ✓ Une quantité de chaleur Q_f absorbée de la source de chaleur froide.
- ✓ Une quantité de chaleur Q_c cédée à la source chaleur chaude.
- ✓ Un travail mécanique W fournit à la machine pour accomplir le transfert de chaleur du milieu froid au milieu chaud.

III.1. Composition de la machine à compression de vapeur

- ✓ **Evaporateur** : placé dans le milieu à refroidir (par exemple une chambre froide) pour assurer l'absorption de la quantité de chaleur Q_f qu'on appelle **production frigorifique** où l'on doit maintenir la température intérieure T_{int} . Le fluide frigorigène qui y entre en **phase liquide** s'évapore à la température $T_{ev} < T_{int}$ en absorbant la chaleur latente nécessaire de la source froide.

- ✓ **Condenseur** : placé dans le milieu auquel on désire céder la quantité de chaleur Q_c et refroidi par le fluide extérieur, air ou eau, à la température T_{ext} où le réfrigérant, qui y entre en **phase vapeur**, se condense à une température $T_{cd} > T_{ext}$ en cédant de la chaleur latente au fluide de refroidissement.
- ✓ **Compresseur** : Cet appareil est l'organe principal de l'installation frigorifique il aspire la vapeur provenant de l'évaporateur puis la comprimer et la refouler vers le condenseur, cette opération conduit à l'augmentation de pression à l'entrée du condenseur, cet organe est placé entre les deux échangeurs.
- ✓ **Détendeur** (valve d'expansion) dont le rôle est de régler le débit du réfrigérant circulant dans l'installation et assurer la détente du réfrigérant (réduire la pression) entre les deux échangeurs.

Ce système est régulé par un thermostat afin d'obtenir une température constante, ou bien par un pressostat pour le réglage de pression

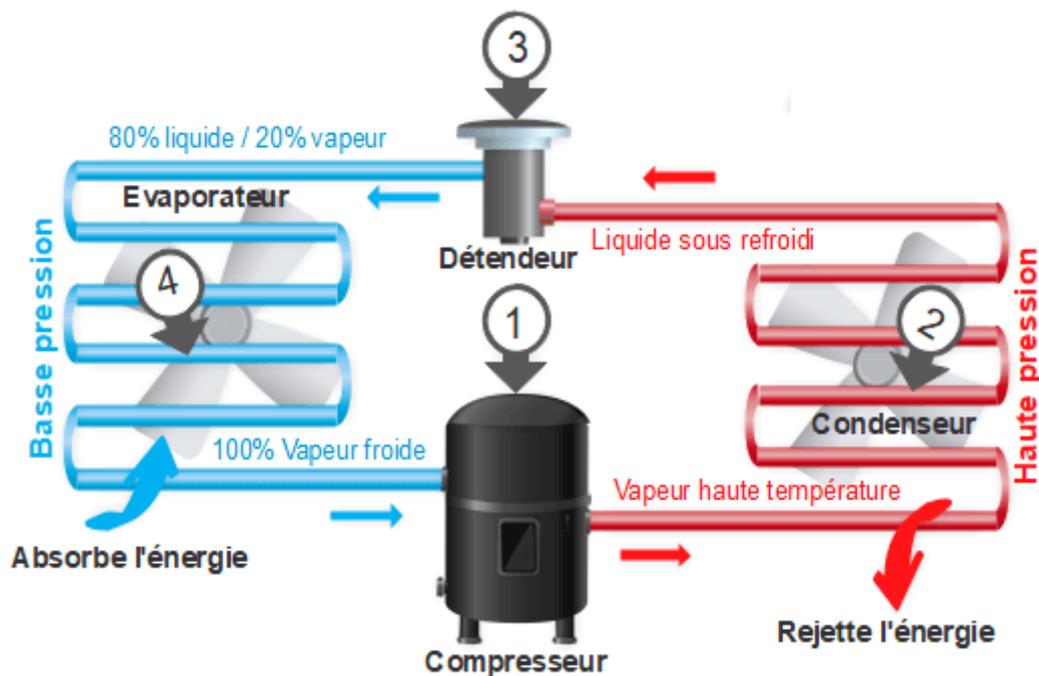


Figure 2.4. Schéma des composants du circuit fluide

III.2. Fonctionnement d'une machine frigorifique à compression

La machine à compression est un système fermé contenant un fluide de travail (*fréon*), il se compose de deux échangeurs, l'un est appelé **évaporateur** il absorbe la chaleur de l'environnement, et l'autre est le **condenseur** il dégage la chaleur absorbée.

Entre ces deux échangeurs se trouve le **compresseur** (*pompe*), la vapeur provenant de l'évaporateur à basse pression est aspirée par le compresseur puis elle se comprimer (augmentation de la pression), et par conséquent il aura un accroissement de la température, la vapeur comprimée est refoulée par le compresseur aux condenseur à haute pression. La chute de pression pour le retour du liquide à l'évaporateur est assurée par un **détendeur** (vanne d'expansion) qui relie les deux échangeurs.

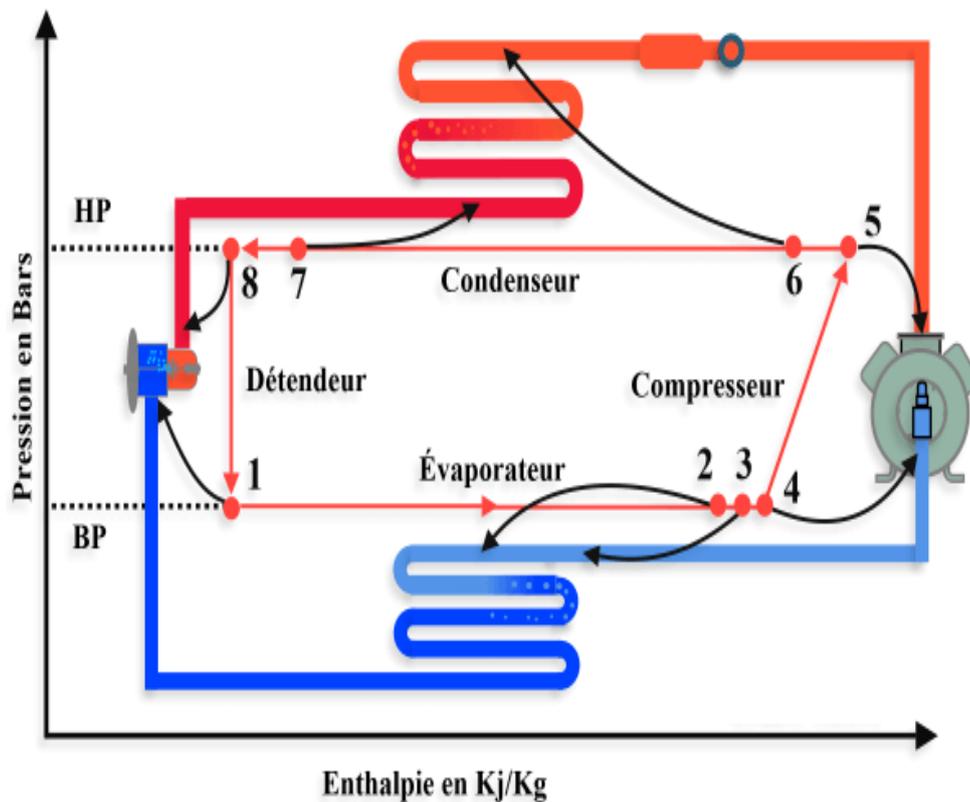


Figure 2.5 Principe de fonctionnement

IV. Représentation du Cycle frigorifique

IV.1. Cycle de référence (Base) sur Diags (T, S), (P, h)

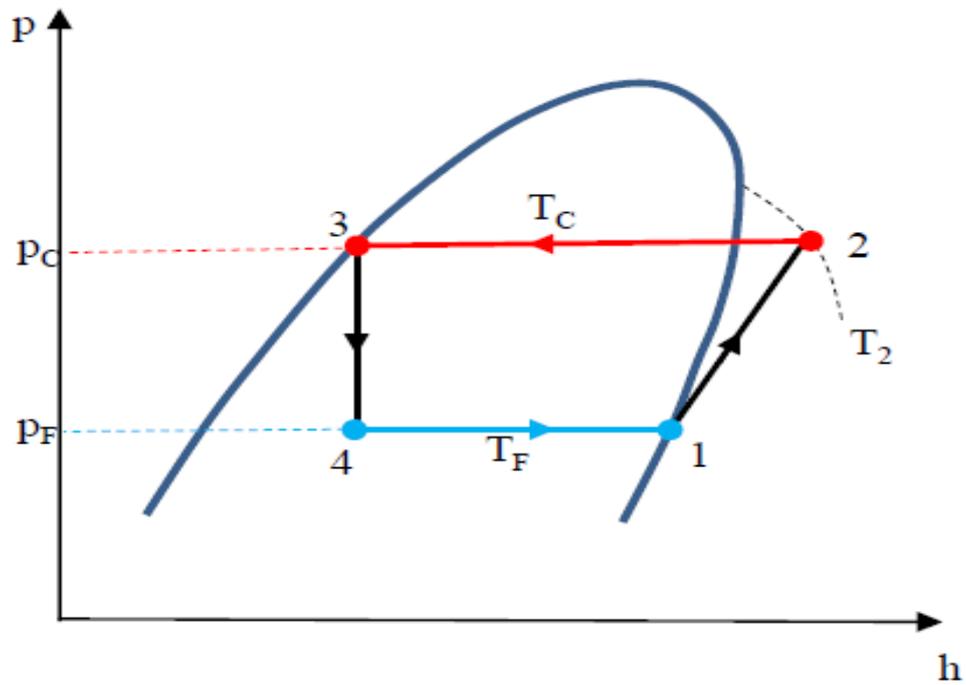


Figure.2.6. Cycle de *Base sur Dig (P h)*

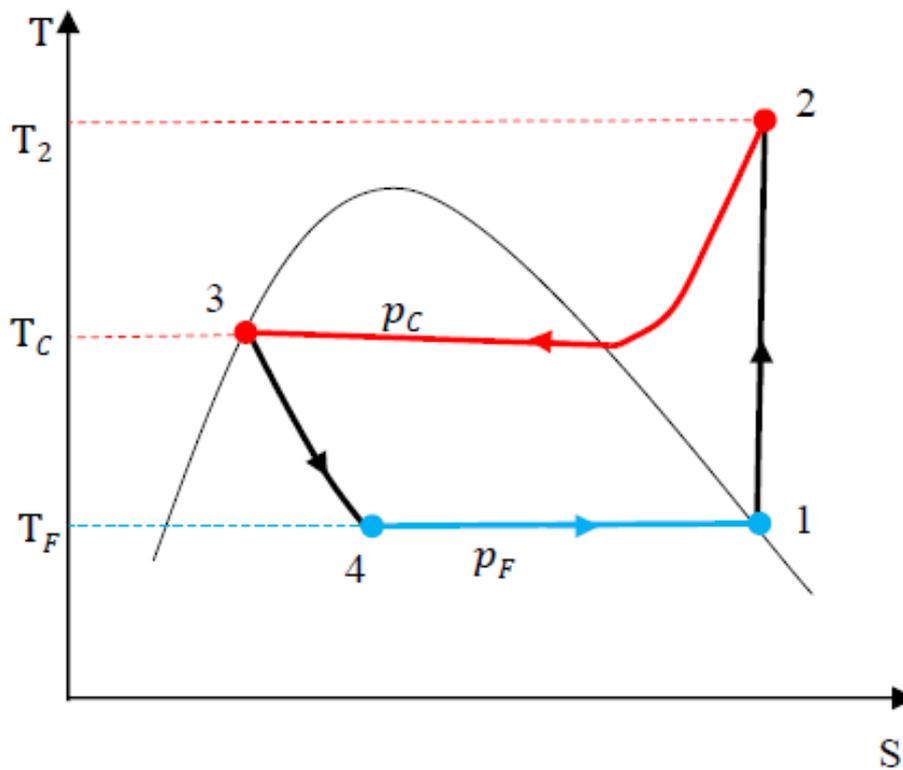


Figure.2.7. Cycle de *Base sur Dig (T S)*

- 1-2 : La vapeur du fluide frigorigène sèche est comprimée dans le compresseur au niveau de pression de condensation P_{cd} . (*Compression isentropique*)

- 2-3 : Le fluide frigorigène dans le condenseur est refroidi dans un premier temps à la température de condensation T_{cd} (processus $2 \rightarrow 2'$ baisse de température). La vapeur est ensuite condensée. Les deux processus se déroulent à la pression de condensation P_{cd} . (*Condensation isobare*)
- 3-4 : Le fluide frigorigène liquide se détend dans l'organe d'étranglement pour atteindre le niveau de pression d'évaporation le plus bas P_{ev} et la température d'évaporation T_{ev} . Le processus se déroule à un niveau d'enthalpie constant. (*Détente Isenthalpique*)
- 4-1: Le fluide frigorigène est évaporé dans l'évaporateur à une pression d'évaporation P_{ev} constante ou à une température d'évaporation T_{ev} constante. (*Evaporation isobare*)

IV.2. Cycle pratique (Réel) sur Diags (T, S), (P, h)

Les points caractéristiques du tracé d'un circuit du cycle réel d'une machine frigorifique sont portés sur la figure (2.8), la figure (2.8a) montre le cycle sur un diagramme (p, h) et (2.8b) celui d'un diagramme (T, S), le point 5 qui est celui de la sortie du détendeur se situe à l'intérieur des courbes de saturation avec un mélange de liquide et de vapeur du fluide frigorigène, l'évolution des transformations sont indiqués ci-dessous.

- Du point 5 au point 6, le fluide frigorigène est à l'intérieur de l'évaporateur sa pression P_c reste constante, il entre au point 5 à l'état de mélange et absorbe de la chaleur en se vaporisant, au point 6' il est à l'état vapeur saturée, entre les points 6' et 6 le fluide frigorigène absorbe toujours de la chaleur et devient à la sortie de l'évaporateur au point 6 une vapeur surchauffée.
- Du point 6 au point 1, le fluide frigorigène parcourt la tuyauterie qui relie la sortie de l'évaporateur à l'entrée du compresseur et s'échauffe en absorbant la chaleur de l'air ambiant puisque sa température est très inférieure à celle de l'ambiance.

- Du point 1 au point 2, le fluide frigorigène est comprimé et passe de la pression P_F à la pression P_c , si la transformation était isentropique il atteindrait le point 2, la transformation se ferait selon une isentrope, en réalité il va atteindre le point $2r$ qui se situe à droite du point 2, son entropie est supérieure, son enthalpie et beaucoup plus importante et sa température est plus élevée.
- Du point 2 au point 3, le fluide frigorigène est à l'intérieur du condenseur sa pression P_F reste constante, au départ il subit une désurchauffe du 2 où il était à l'état de vapeur surchauffée au point $2'$ à l'état de vapeur saturée, la vapeur à l'intérieur du condenseur se condense jusqu'au point $3'$ ou elle devient un liquide saturé, de $3'$ à 3 on a un sous-refroidissement du liquide frigorigène.
- Du point 3 au point 4, le fluide frigorigène circule à l'intérieur de la tuyauterie qui relie le condenseur au détendeur, le liquide subit encore un sous-refroidissement, puisque sa température est supérieure à celle de l'air ambiant.
- Du point 4 au point 5, le fluide frigorigène passe de l'état de liquide sous-refroidi à celui de mélange de vapeur et de liquide avec un titre de x_5 en vapeur, pendant la transformation l'enthalpie reste constante, sa pression diminue de P_c à la valeur de P_F , et le cycle reprend.

➤ ***Surchauffe***

Un compresseur peut transporter, en raison de sa construction, que des gaz ou de la vapeur. Les liquides ne peuvent pas être comprimés et ne sauraient par conséquent figurer dans la chambre à compression du compresseur.

Afin d'éviter toute aspiration de liquide, l'état d'aspiration du compresseur est décalé de la ligne de rosée vers la droite. On „**Surchauffe**“ la vapeur du fluide frigorigène. Sa température T_1 est située au-dessus de la température T_{ev} . La surchauffe est calculée de la manière suivante :

Surchauffe = température de sortie d'évaporateur - température d'évaporation

$$\Delta T_{sch} = T_1 - T_{ev}$$

ΔT_{sch} : Ecart de la surchauffe à la sortie d'évaporateur en (°C)

T_1 : Température d'aspiration du compresseur en (°C)

T_{ev} : Température d'évaporation du fluide en (°C)

➤ ***Sous-Refroidissement***

Si l'installation frigorifique est exploitée de telle sorte que l'état "Entrée détendeur" se trouve directement sur la courbe de séparation gauche (ligne d'ébullition), les moindres variations des conditions d'exploitation peuvent provoquer la formation de bulles en amont du détendeur.

Pour cette raison, l'état entrée détendeur T_4 est déplacé de la ligne d'ébullition vers la zone liquide et on parle alors de „**Sous-refroidissement**“. Qui garantit une alimentation en liquide à l'avant de la soupape de détente,

Le sous-refroidissement est calculé de la manière suivante :

Sous refroidissement = Température de condensation - Température de sortie de condenseur

$$\Delta T_{srf} = T_{cd} - T_4$$

ΔT_{srf} Ecart du sous-refroidissement à la sortie du condenseur en (°C)

T_4 Température du FF à la sortie du condenseur en (°C)

T_{cd} Température de condensation en (°C)

➤ *Etat du fluide aux différents points du cycle :*

Point	Température	Pression	Etat du fluide
1	T_1	p_F	Vapeur surchauffée
2	T_2	p_C	Vapeur surchauffée
2'	T_C	p_C	Vapeur saturée
3'	T_C	p_C	Liquide saturé
3	T_3	p_C	Liquide sous-refroidi
4	T_4	p_C	Liquide sous-refroidi
5	T_F	p_F	Mélange avec titre x
6'	T_F	p_F	Vapeur saturée
6	T_6	p_F	Vapeur surchauffée

Tableau (II.1) *Etat du fluide aux différents points du cycle*

➤ *Ecart total sur l'air*

Evaporateur air/condenseur air	CONDENSEUR	
	Ecart t° entrée air - sortie air	5-10°C
	Ecart t° condensation - entrée air	11-15°C
	EVAPORATEUR	
	Ecart t° entrée air - sortie air	6-10°C
	Ecart t° entrée air - T° évaporation	15 -20°C
	Surchauffe	5-8°C
	Sous-refroidissement	4-7°C
Evaporateur air/condenseur eau perdue	CONDENSEUR	
	Ecart t° entrée eau - sortie eau	10-15°C
	Ecart t° condensation - sortie eau	5 -7°C
	EVAPORATEUR	
	Ecart t° entrée air - sortie air	6 -10°C
	Ecart t° entrée air - T° évaporation	15-20°C
	Surchauffe	5-8°C
	Sous-refroidissement	4-7°C

Tableau (II.2) *Ecart total sur l'air*

V. Bilan thermique du cycle thermodynamique

V.1 Puissance de chaque composant

Utilisons l'expression du premier principe de la thermodynamique soit :

$$\Delta h = W + Q$$

Sur l'Évaporateur (production du froid) :

Puissance frigorifique Q_f d'une installation est donnée par la formule suivante : $W=0$ Il n'y a pas du travail fournit donc :

$$Q_l = \Delta h = h_1 - h_6$$

h_1 Enthalpie à l'aspiration du compresseur (Kj/kg)

h_6 Enthalpie à l'entrée d'évaporateur (Kj/kg)

Q_l Chaleur latente absorbée par l'évaporateur (Kj/kg)

- La puissance frigorifique Q_f se calcule comme suite

$$Q_f = \dot{m} Q_l$$

$$Q_f = \dot{m} (h_1 - h_6)$$

\dot{m} Débit du fluide frigorigère circulant dans l'installation (Kg/s)

Sur le Condenseur :

- La puissance calorifique du condenseur

$W=0$ Il n'y a pas du travail fournit

$$Q_C = \dot{m} (h_5 - h_2)$$

Sur le Compresseur :

- Le travail du compresseur est donné par :

$Q=0$ il n'y a pas un échange thermique

$$W_{Cp} = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

Sur le Détendeur :

- Transformation Isenthalpique : $h = \text{Constante}$

$$\Delta h = 0$$

$$h_5 - h_6 = 0$$

$$h_5 = h_6$$

V.2. Coefficient de performance, COP

Le COP est coefficient qui représente la rentabilité du système et aussi c'est un indicateur qui nous permet de distinguer entre les différents systèmes utilisés

➤ *Expression du COP*

$$\text{COP} = \frac{\text{Puissance frigorifique produite à la source froide}}{\text{Puissance consommée}} = \frac{Q_f}{W_{cp}}$$

VI. Application du froid

L'utilisation du froid actuellement est très variés par son intensité et son utilisation, elle touche pratiquement tous les domaines de la vie et celui industriel, mais l'utilisation la plus répandu est :

- La conservation des aliments que ce soit au niveau domestique avec l'utilisation des réfrigérateurs et des congélateurs ou au niveau industriel avec la transformation, le stockage et la distribution ; on retrouve deux niveaux de froid, la réfrigération lorsque la température est autour de 0°C, et la congélation avec une température qui descend à -20°C.
- Les applications importantes au niveau industriel sont la préparation et la liquéfaction des gaz industriels et d'hydrocarbures, en effet des systèmes complexes sont montés pour obtenir des températures très basses pour les processus de distillation, séparation et traitement dans les domaines de génie des procédés et de pétrochimie.
- Le conditionnement d'air et la climatisation individuelle ou collective prend une part importante de plus en plus en vue d'assurer le confort et le bien-être, pratiquement tous les lieux publics où il y a des flux importants de personnes, sont dotés d'équipements pour le chauffage et la climatisation en été.
- Il existe aussi des installations industrielles qui nécessitent le refroidissement de leurs procédés

VII. Notion de Fluides frigorigènes

Le fluide frigorigène de la pompe à chaleur assure une tâche importante en tant que médium, en quelque sorte en « transportant » la chaleur du bas niveau de température de la source de chaleur à un niveau plus élevé. Il y a déjà vingt ans que l'on a découvert que les chlorofluorocarbones (CFC) provoquent une réaction conduisant à la destruction de la couche d'ozone. Les fluides frigorigènes concourent également d'une manière significative à l'effet de serre. Manipulation et autorisation des fluides frigorigènes sont réglés par l'Ordonnance sur les matières dangereuses pour l'environnement, mise en application par le Conseil fédéral en août 1991. Outre l'impact sur l'environnement, il faut également considérer la température de départ du chauffage, lors du choix d'un fluide frigorigène. Suivant la température de fonctionnement, différents fluides pourront convenir.

Les R12 et R502, deux CFC halogénés largement répandus dans la technique des pompes à chaleur, sont interdits depuis le 1^{er} janvier 1994 pour de nouvelles installations. Dans le monde entier, l'industrie chimique travaille au développement de fluides de substitution et à leur mise sur le marché aussi rapide que possible.

Les fluides de substitution les plus utilisés sont avant tout les fluorocarbures (HFC) tels que le R134a, ainsi que les hydrocarbures tels que l'isobutane (R600a) et le propane (R290).

Le R134a présente des propriétés physiques semblables à celles du R12 et constitue donc actuellement le principal fluide de substitution. Des études effectuées sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie ont montré qu'un échange des fluides frigorigènes dans les installations existantes est possible. Pour les petites installations, une telle substitution a peu de chances d'être réalisée, pour des raisons de coût. Comme solution provisoire, on utilise maintenant souvent le R22, un HCFC partiellement halogéné, caractérisé par un faible potentiel de destruction de l'ozone, mais toutefois avec un potentiel encore élevé d'augmenter l'effet de serre. Les températures de départ de 45 à 50°C que l'on peut atteindre avec ce fluide sont cependant bien moins élevées qu'avec du R12 ou du R134a. En Suisse, le R22 ne sera plus autorisé pour de nouvelles installations dès 2001. A côté des fluides synthétiques mentionnés jusqu'ici, on trouve également des fluides naturels, tels que l'isobutane et le propane, mais aussi l'ammoniac. Ils présentent l'avantage de ne pas mettre en danger la couche d'ozone et de ne pas contribuer à l'effet de serre. En outre, les effets à long terme liés à leur utilisation sont bien connus. Ces fluides ne sont

toutefois que très rarement utilisés pour des systèmes de pompes à chaleur dans le secteur de l'habitation, et c'est pourquoi nous ne les étudierons pas plus en détail. Des informations complémentaires peuvent être obtenues auprès de l'Office fédéral de l'environnement.

Test de connaissance

I. Rependez par Vrai ou Faux

Questions	Vrai	Faux
1. Le compresseur joue le rôle d'une pompe		
2. Une installation frigorifique est pour but de chauffer les locaux		
3. L'évaporateur permet d'extraire la chaleur du milieu à refroidir		
4. Le détendeur est un organe utilisé pour diminuer la pression		
5. Le compresseur aspire et comprime et refoule le liquide provenant d'EV		
6. Le parcours du fréon est un système ouvert		
7. La condensation est un phénomène subit par le fluide au niveau du condenseur		
8. La PAC est une machine motrice		
9. Pour extraire la chaleur on doit fournir un travail		
10. Le signe de la source froide dans l'installation frigorifique est négatif		
11. L'évaporation est un changement d'état nécessite un apport de chaleur		
12. Si l'évaporateur est en contact avec la source chaude on parle d'une IF		
13. Si le condenseur est en contact avec la source froide on parle d'une PAC		
14. Le rendement du cycle de Carnot est toujours supérieure à l'unité		
15. Les échangeurs de l'installation frigorifique fonctionnent dans le sens opposé		

II. Cocher la bonne réponse :

1. La condensation est une transformation qui :

- a. Absorbe de la chaleur
- b. Diminue la pression
- c. Dégage de la chaleur



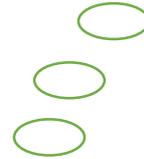
2. En traversant l'évaporateur, le fluide frigorigène absorbe de la chaleur.

- a. Vrai
- b. Faux
- c. Dépend du type de fluide



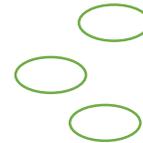
3. La température de condensation du fluide frigorigène dépend de la température ambiante

- a. Vrai
- b. Faux
- c. Dépend du type de l'installation



4. Si le bulbe d'un détendeur thermostatique se perce, toute la charge en fluide frigorigène de l'installation part à l'atmosphère.

- a. Vrai
- b. faux
- c. dépend de la position du détendeur dans l'installation



**5. Au sein d'un condenseur, quelles sont les différentes zones que l'on peut trouver ?
(Plusieurs réponses possible)**

- a. La zone de condensation
- b. La zone de désurchauffe
- c. La zone de surchauffe
- d. La zone de sous-refroidissement



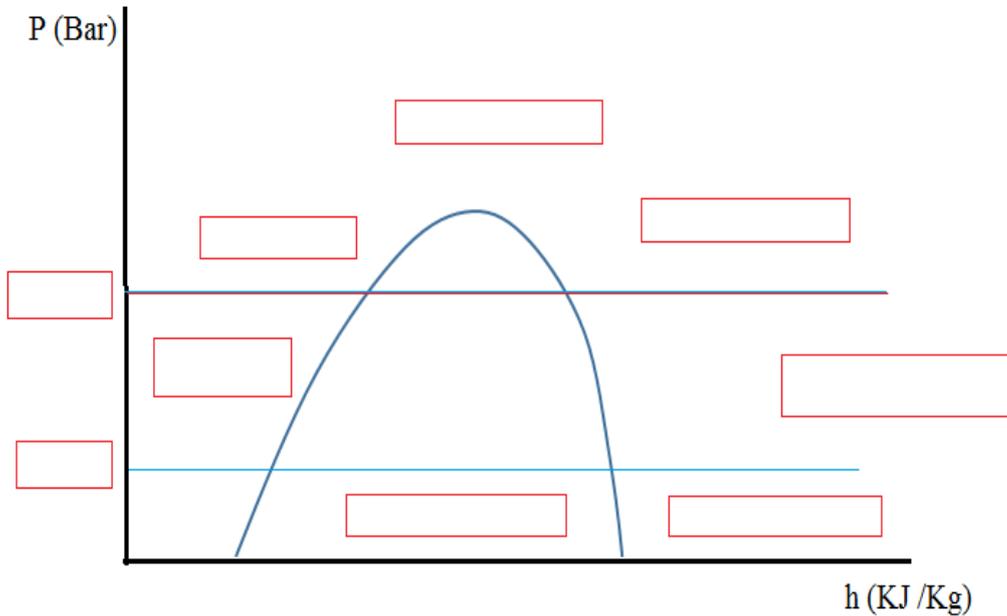
6. Le cycle de Carnot contient deux transformations

- a. Deux isothermes et deux adiabatiques
- b. Deux isothermes et deux Isobares
- c. Deux Isobares et deux Isochores



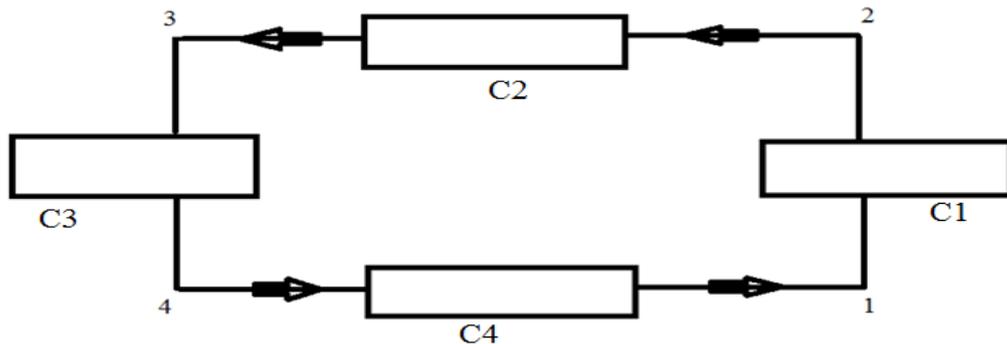
Exercices 1

Tracer le cycle du parcours du fluide et Remplir les cases vides



Exercices 2

Une machine thermique (voir schéma ci-dessous) est constituée de quatre composants parcourus par un fluide, *fréon R410A*, dont le sens de parcours est représenté par les flèches. On considère que le fréon subit un écoulement en régime permanent aux bornes des quatre composants. Chaque composant est relié à une seule entrée et une seule sortie.



- ✓ Au point 1, le fluide est sous forme de Vapeur surchauffée à la pression $P_1 = 1.5$ bars.
- ✓ Au point 2, le fluide est sous forme de Vapeur surchauffée à la pression $P_2 = 8$ bars.
- ✓ Au point 3, le fluide est sous forme de Liquide à $T_3 = 0^\circ\text{C}$.
- ✓ Aux bornes du composant C3 la transformation est **Isenthalpique**.

- ✓ Aux bornes des deux composantes C_2 et C_4 , les transformations sont **Isothermes**, et s'effectuent à la température T_{c2} pour la transformation **2-3**, et à la température T_{c4} pour la transformation **4-1**
- ✓ Lors de la transformation **4-1**, le composant C_4 échange une quantité massique de chaleur $Q_{1,4}$ avec le milieu extérieur : $Q_{1,4} = 12.54 \text{ KJ/kg}$
- ✓ Le seul travail mis en jeu dans le composant C_1 .

Questions

1. Citer le composant de chaque case
2. Tracer le cycle frigorifique sur le diagramme Enthalpie
3. Remplir le tableau ci-dessous

Points	Température T (°C)	Pression P (bar)	Enthalpie h (KJ/kg)
1			
2			
3			
4			

4. Calculer le débit masse du fluide circulant dans l'installation
5. Calculer la puissance $Q_{2,3}$ du condenseur et le travail du compresseur

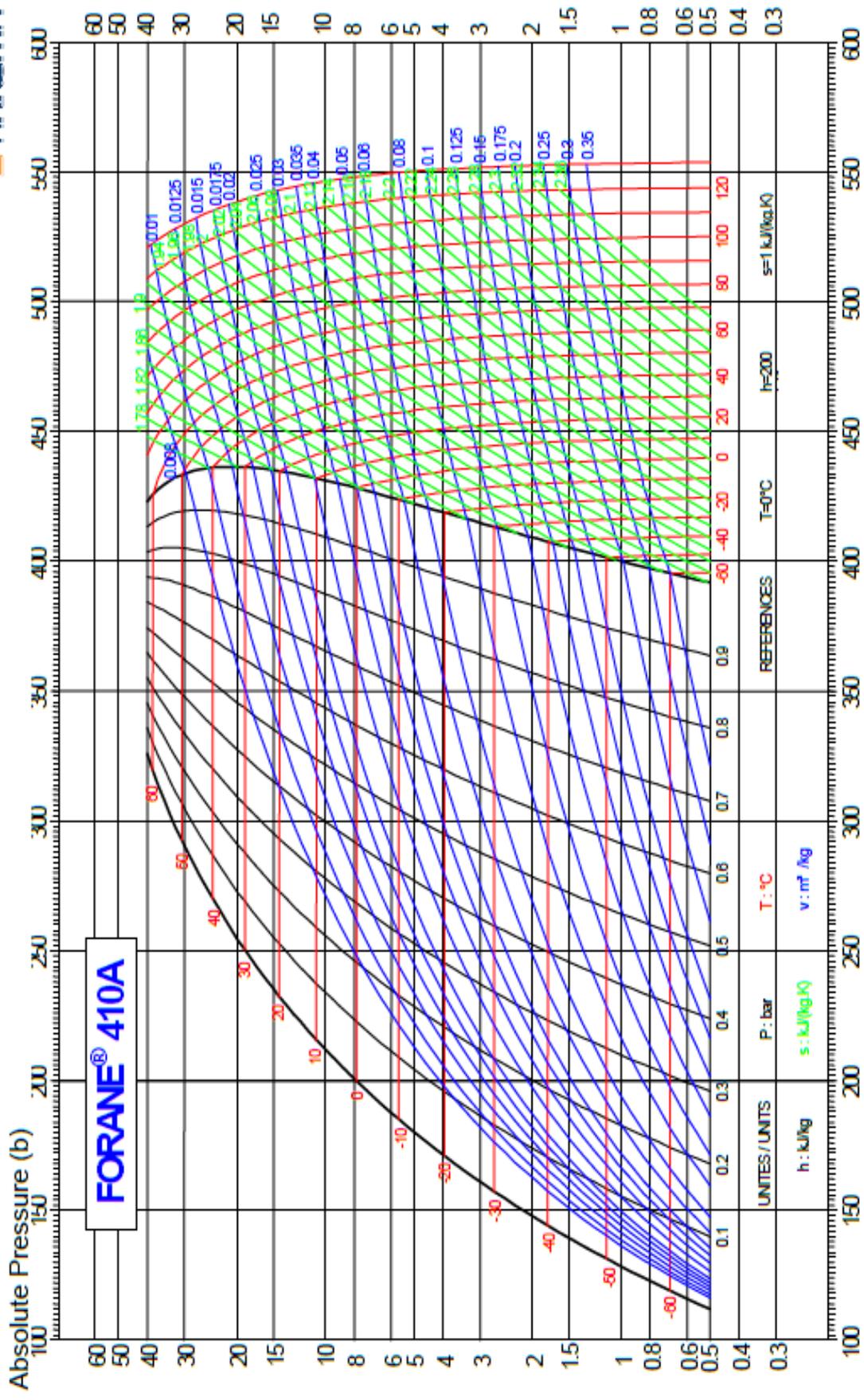
Exercices 3

Un climatiseur fonctionne avec le fréon R410A, le parcours du fluide est évolué entre deux valeurs de pressions $BP = 4 \text{ bar}$, et $HP = 30 \text{ bar}$, la température du gaz à l'aspiration du compresseur $T_1 = -10^\circ\text{C}$, et celle à l'entrée du détendeur $T_5 = 45^\circ\text{C}$. le débit massique du fluide $\dot{m} = 1,5 \text{ Kg/s}$

Questions

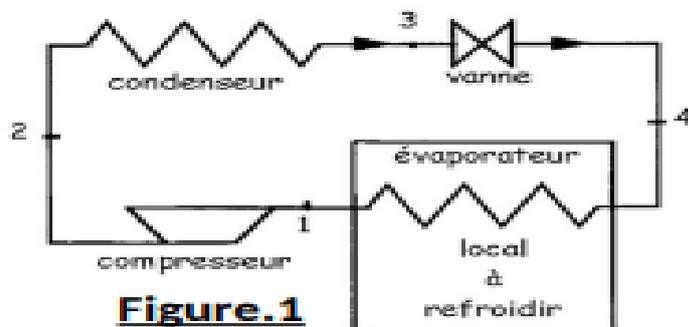
1. Tracer le cycle de parcours du fluide sur le diagramme enthalpique
2. Compléter le tableau ci-dessous
3. Donner les valeurs de : Sous-refroidissement, et Surchauffe
4. Calculer les différentes puissances du circuit

Points	Température T (°C)	Pression P(bar)	Enthalpie h (KJ/kg)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			



Exercice 4

On réalise une machine frigorifique dont le fluide frigorifique est le fréon. Le schéma de cette machine est le suivant (Fig.1). Le diagramme de Mollier (enthalpie – pression) du fréon représenté ci-dessous (Fig. 2) sera utilisé pour tracer le cycle frigorifique de cette machine.



I. La vapeur est comprimée isentropiquement de **2.7 bars** à **8 bars** dans le compresseur. Elle subit ensuite une transformation isobare dans le condenseur jusqu'à liquéfaction totale (trajet 2-3), puis une détente isenthalpique de **8 à 2,7 bars** par le détendeur (trajet 3-4), et enfin une transformation isobare dans l'évaporateur du local à refroidir (trajet 4-1).

✓ Questions

1. Quelles sont les indications (paramètres) fournies par le diagramme de Mollier du fréon ? Tracer le cycle des transformations 1-2-3-4-1 sur ce diagramme.
2. Calculer la variation de l'enthalpie massique du fluide au cours de l'évaporation. En déduire la quantité de chaleur retirée du local à refroidir par unité de masse de fluide.
3. Calculer la variation d'enthalpie massique du fluide au cours de la compression. En déduire le travail massique de compression.
4. Calculer l'efficacité de ce cycle. Et rétablir l'efficacité théorique d'une machine frigorifique réversible fonctionnant entre les mêmes températures (T_3 et T_4).
5. La production frigorifique à l'évaporateur étant de **120 000 kJ/h** (soit 120 000 kJ retirés au local à refroidir) Calculer le débit du fréon. Quelle est la puissance mécanique de l'installation ?

II. Pour améliorer les performances de la machine frigorifique fonctionnant entre les mêmes pressions, on réalise un "sous-refroidissement" isobare 3-3' du liquide avant la détente. La température du liquide est alors abaissée à **-5°C**. et une surchauffe isobare 1-1' du gaz avant le compresseur. la température du gaz est augmentée avec un écart de **10°C**

1. Placer les points 1' et 3' sur le diagramme de Mollier.
2. Après la détente isenthalpique le fluide est à l'état 4' Placer ce point sur le diagramme.
3. Après la compression le fluide est à l'état 2', Placer ce point sur le diagramme

- Tracer (en couleurs) le cycle des transformations de la nouvelle machine.
- Donner les valeurs des écarts de la surchauffe et du refroidissement.
 - On maintient le même débit. Calculer la nouvelle production frigorifique. Comparer cette installation à la précédente (puissance frigorifique, travail du compresseur, efficacité).
 - On maintient le même débit. Calculer la nouvelle production frigorifique. Comparer cette installation à la précédente (puissance frigorifique, travail du compresseur, efficacité).

Exercice 5

L'intervention sur une installation frigorifique fonctionnant par le fréon R410A indique que l'écart de la surchauffe $\Delta T_{Sch} = 10^\circ C$ et la température à l'aspiration du compresseur $T_1 = -10^\circ C$, et le débit massique circulant dans l'IF $\dot{m} = 2 \text{ kg/s}$. Si la puissance d'évaporateur $Q_f = 320 \text{ (Kj/s)}$, et l'enthalpie à l'entrée d'évaporateur $h = 200 \text{ (Kj/kg)}$ et celle à la sortie du compresseur $h = 400 \text{ (Kj/kg)}$.

Déterminer :

- La température d'évaporation T_{ev}
- Le travail du compresseur
- La puissance de condenseur
- Le COP de l'installation

Exercice 6 (fluides frigorigènes)

Donner la forme chimique pour les fluides frigorigènes suivants :

Propane R290

Butane R134

Donner la forme commerciale de

$C_2H_2F_4$

C_2H_6

CHAPITRE 03

Composants d'une installation frigorifique

Sommaire	Page
<i>I. Introduction</i>	41
<i>II. Compositions</i>	41
<i>II.1. Composants principaux</i>	41
<i>II.1.1. Echangeurs de chaleur</i>	41
<i>II.1.2. Compresseurs</i>	43
<i>II.1.2.1. Compresseurs volumétriques</i>	43
<i>II.1.2.2. Compresseurs dynamiques</i>	45
<i>II.1.3. Organes de détente</i>	45
<i>II.2. Composants Annexes</i>	46
<i>Exercices (Série TD 04)</i>	48

I. Introduction

Une machine frigorifique est, comme un réfrigérateur, une machine thermodynamique constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide de travail (fluide frigorigène). Ce circuit est composé de quatre éléments principaux : un compresseur, un détendeur et deux échangeurs de chaleur (le condenseur et l'évaporateur). Le but de cette machine thermodynamique est de transférer l'énergie d'un milieu froid (source froide) à un milieu chaud (source chaude).

II. Compositions

Une installation frigorifique se compose des composants principaux et composants annexes

- Composants principaux
 - Echangeurs de chaleur
 - Compresseurs
 - Détendeurs

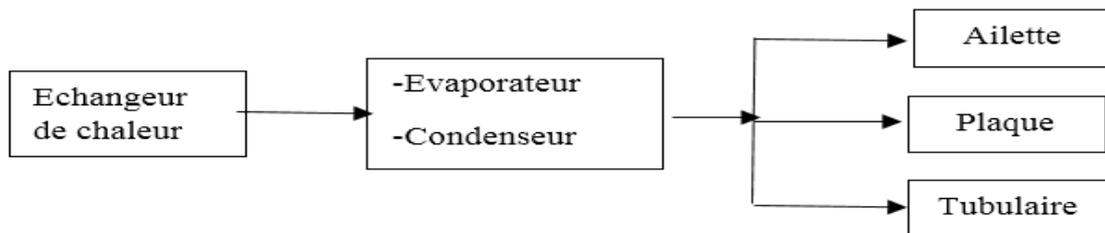
- Appareils annexes
 - Bouteille liquide
 - Des-hydrateur
 - Voyant liquide
 - Pressostat et Thermostat

II.I. Composants principaux

II.I.1. Echangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont des appareils qui sert pour transférer la chaleur d'un milieu à l'autre soit par :

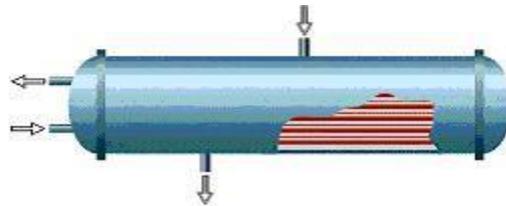
- * Absorption de la chaleur : Evaporateur
- * Dégagement de la chaleur : Condenseur



a. Ailette



b. Plaque



c. Tubulaire

➤ Evaporateur

La fonction de l'évaporateur est d'extraire la chaleur de l'air ou de l'eau glycolée et de transférer cette chaleur vers le fluide frigorigène. La température d'évaporation doit toujours être inférieure à la température de l'air ou de l'eau glycolée. Cette condition est assurée par l'aspiration constante du compresseur (Basse pression BP). Nous retrouvons dans l'industrie frigorifique différents types d'évaporateurs. Il existe des évaporateurs à air (à convection naturelle ou forcée) ou des évaporateurs à eau. Dans les chambres froides - *par exemple* - nous utilisons des évaporateurs à air et généralement la convection est forcée, autrement dit, ces derniers sont munis de ventilateurs assurant le brassage de l'air.

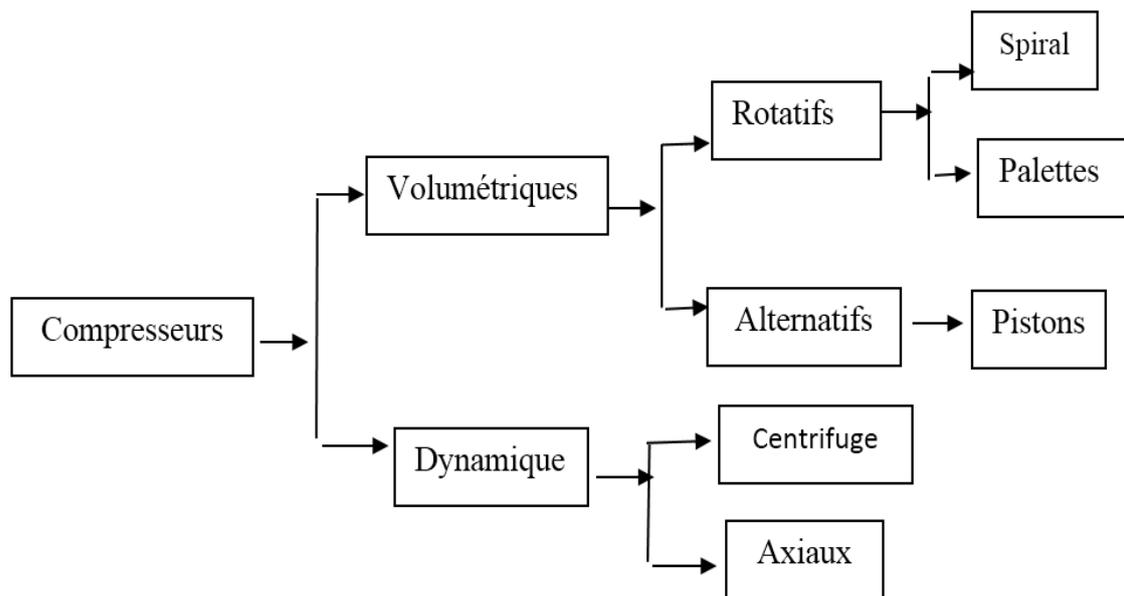
➤ Condenseur

Le condenseur a pour fonction de transporter la chaleur hors du circuit du fluide frigorigène. Cette chaleur est cédée à l'air. Étant donné qu'un courant thermique ne peut s'écouler que s'il existe une différence de température, la température de condensation doit toujours être supérieure à la température d'entrée de l'air ambiant. La puissance de condensation à évacuer comprend la puissance frigorifique du

condenseur, la puissance motrice du compresseur et toutes les autres puissances thermiques absorbées

II.1.2. Compresseurs :

Le rôle du compresseur est d'aspirer, comprimer et refouler, le fluide frigorigène provenant d'évaporateur. On peut classer les compresseurs en deux types selon leur fonctionnement



II.1.2.1. Compresseurs volumétriques :

Dans lesquels la compression des vapeurs est obtenue par la réduction du volume intérieur d'une chambre de compression, c'est le type de compresseur le plus répandu sur les installations frigorifiques.

Il existe plusieurs types de compresseurs volumétriques et la classification retenue permet de distinguer

- a. Alternatif, Compresseur à pistons :
 - ❖ Il y a deux types courants - Compresseur hermétique
 - Compresseur semi hermétique
- ✓ Le piston descend, la soupape d'aspiration est ouverte, l'ouverture de cette dernière provoque l'entrée de l'air à la chambre de compression, et la soupape de refoulement étant fermée.

- ✓ Le piston remonte, les deux soupapes sont fermées, le fluide est comprimé, la pression dans la chambre de compression augmente.
- ✓ La soupape de refoulement s'ouvre, le piston chasse le fluide comprimé.



i. Semi Hermétique
Hermétique

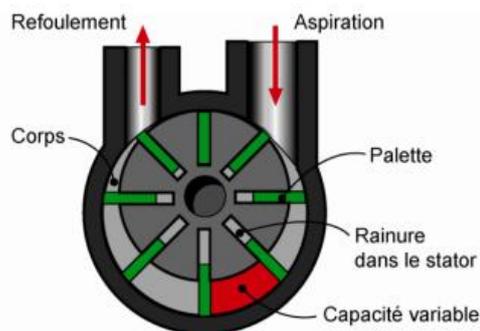


b.

b. Compresseur rotatif

❖ Palette

Un rotor monté excentré dans un cylindre, lorsque le rotor tourne le volume de fluide crée entre les palettes décroît de la zone d'aspiration à la zone de refoulement.



❖ Spirale

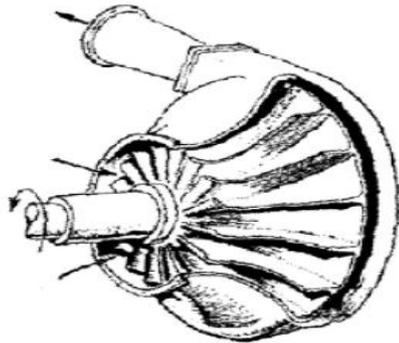
Un compresseur rotatif spirale contient deux pièces de forme spirale l'une est fixée et l'autre mobile, le centre de rotation de spirale mobile est décalé par rapport à celui de la spirale fixée.



II.1.2.2. Compresseurs dynamique

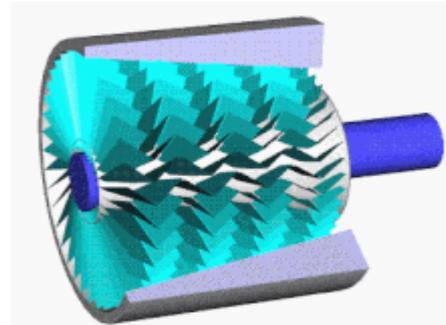
❖ Centrifuge

Appelés aussi turbocompresseur, sont des machines de type radial avec un rotor qui tourne à vitesse uniforme, ainsi le fluide s'écoule de façon permanente. Suivant le fluide frigorigène utilisé.



❖ axial

Le compresseur axial est un type de compresseur mécanique dont le flux gazeux, de plus en plus comprimé, suit l'axe de rotation, et dont le fluide de sortie a un mouvement axial



II.1.3. Détendeur

Le détendeur est un organe placé entre le condenseur et l'évaporateur son rôle est d'abaisser la pression de haute vers la basse dans l'installation frigorifique. Il y a deux types de détendeur les plus utilisés

❖ Capillaire

Tube fin de 0,2 jusqu'à 0,6 mm de diamètre avec une longueur de 1,2 à 1,5 m, raccorder le condenseur avec l'évaporateur.



❖ Thermostatique

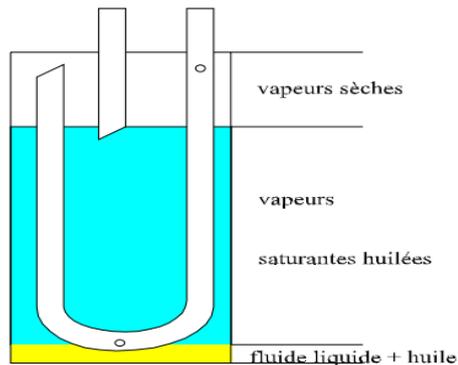
Est un *régulateur de pression* se compose par un bulbe placé à la sortie de l'évaporateur, et un organe de régulation placé entre le condenseur et l'évaporateur



II.2. Composants annexes (appareils de sécurité)

❖ Bouteille anti-coup de liquide

Placée entre l'évaporateur et le compresseur, son rôle est d'éviter l'aspiration éventuelle de liquide et l'huile par le compresseur



❖ Bouteille liquide

Elle permet de contenir le fluide frigorigène surplus. Soit :

- l'installation est à l'arrêt
- quand on fait un dépannage

Elle positionnée sur la partie liquide en aval de condenseur



❖ Des-hydrateur

Organe utilisé pour capter l'humidité et les éléments nuisibles se trouvant dans le fluide. Il est placé avant le voyant sur la ligne liquide



❖ Voyant liquide

Organe permet de contrôler le taux d'humidité dans le fluide et placé sur la ligne liquide.

- La couleur verte : humidité faible.
- La couleur jaune : humidité très élevée.
- La couleur bleu : indiquée la quantité de vapeur



❖ Pressostat

- Utiliser pour le réglage de la pression.
- Pour assurer une protection contre une faible pression à l'aspiration ou une pression de refoulement trop élevée.



❖ Thermostat

- Appareils destinés à ouvrir ou fermer un circuit électrique sous l'action d'une variation de température.

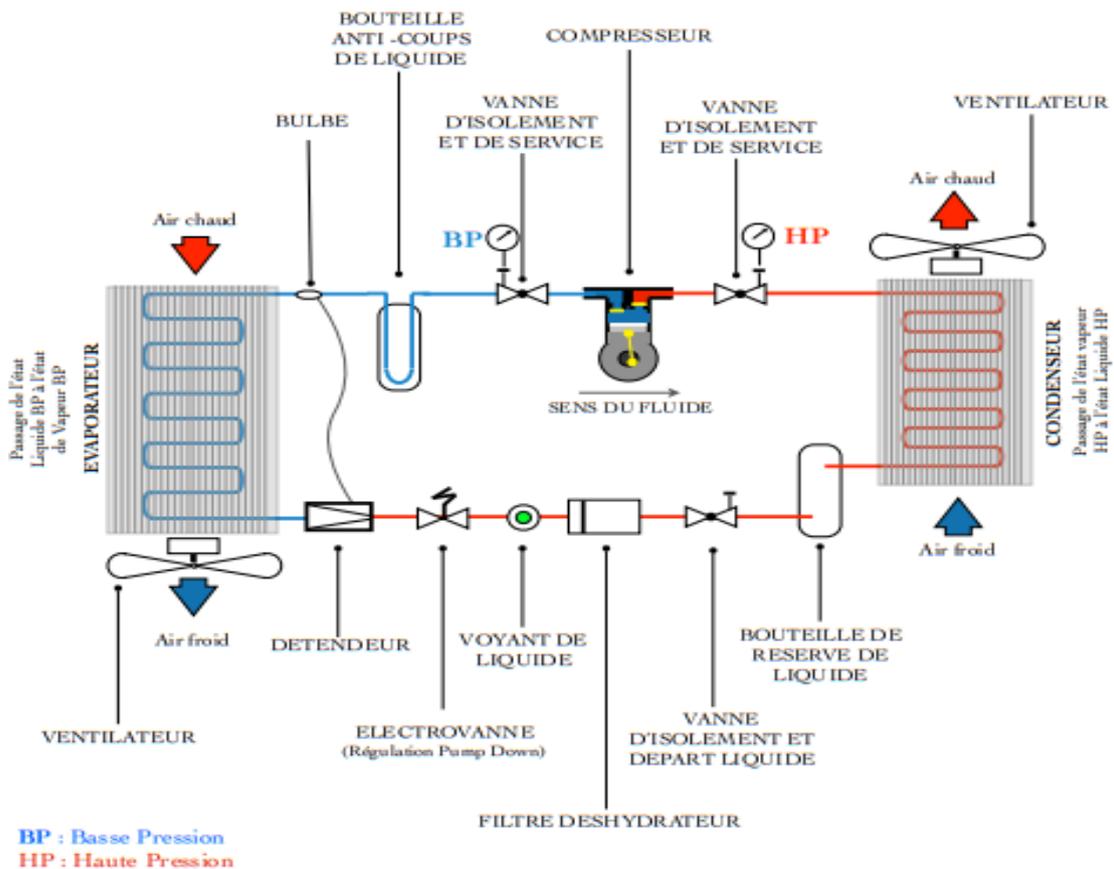
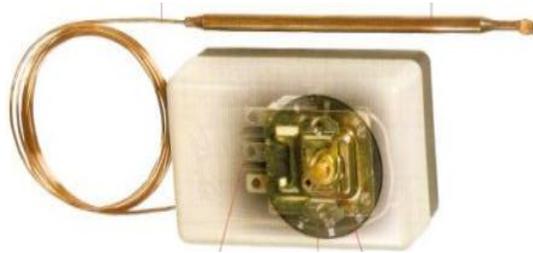
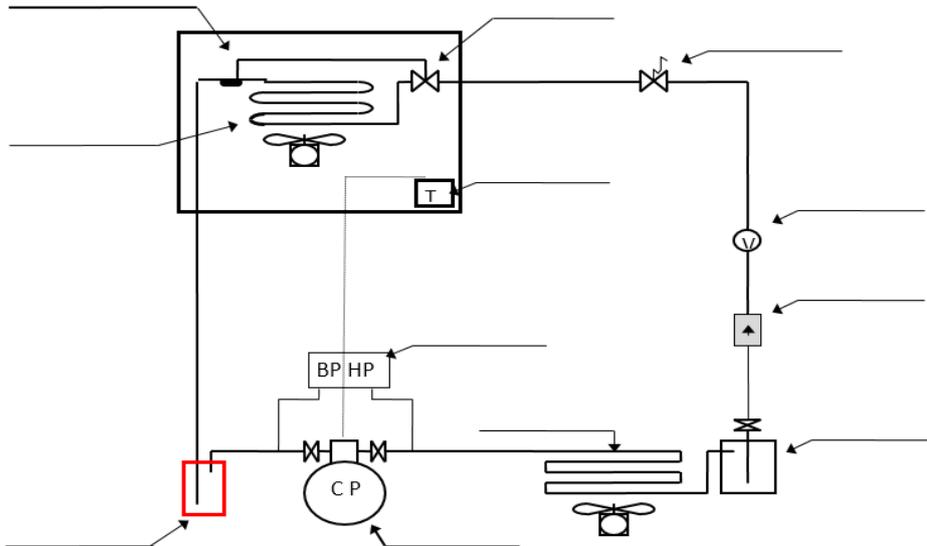


Figure 3.1. Circuit d'une machine frigorifique avec ses composants

I. Composants d'une installation frigorifique :

- Citer le nom de chaque composant.
- Donner le rôle de chaque composant principaux.



II. Test de connaissance :

Cocher la bonne réponse

<i>Questions</i>	<i>Vrai</i>	<i>Faux</i>
La production de froid s'effectue au niveau de l'évaporateur		
Le fluide frigorigène évolue dans une IF entre deux valeurs de la pression		
Le condenseur est un composant annexe de l'installation frigorifique		
Les propriétés thermo-physique du fluide frigorigène change avec le temps		
Le changement d'état (liquide / vapeur) s'effectue au niveau de détendeur		
La température est un grandeur physique mesuré par un manomètre		
Une PAC peut être une IF		
Le passage d'un état liquide à un état vapeur nécessite un apport de chaleur		
La puissance frigorifique dépend du type de fluide utilisé		
Le voyant est un organe permet d'absorber l'humidité dans l'installation		
La bouteille de liquide permet de séparer l'huile au liquide		
Le thermostat est un organe de contrôle		

CHAPITRE 04

Cycle thermodynamique D'une Pompe à chaleur (PAC)

Sommaire	Page
<i>I. Introduction</i>	51
<i>II. Principes de fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC)</i>	51
<i>III. Vanne d'inversion de cycle</i>	52
<i>III.1. Principe de fonctionnement</i>	52
<i>III.2. Schéma fluidique</i>	53
<i>IV. Différents types de pompes à chaleur</i>	54
<i>IV.1. Pompe à chaleur Air /Air</i>	54
<i>IV.2. Pompe à chaleur Sol /Air en captage horizontal</i>	54
<i>IV.3. Pompe à chaleur Sol / Air avec sonde profonde</i>	55
<i>IV.4. Pompe à chaleur en captage sur nappe d'eau</i>	55
<i>V. Coefficient de performance</i>	56
<i>Exercices (TD Série 05)</i>	57

I. Introduction :

Une pompe à chaleur est une machine frigorifique qui parvient, lorsqu'on veut, à prélever de la chaleur d'une source froide extérieure (Air, Eau...) et la céder à une source chaude (pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire).

Il existe deux grandes familles de pompes à chaleur : les pompes à chaleur à compression et les pompes à chaleur à absorption qui sont beaucoup moins diffusées que celles à compression.

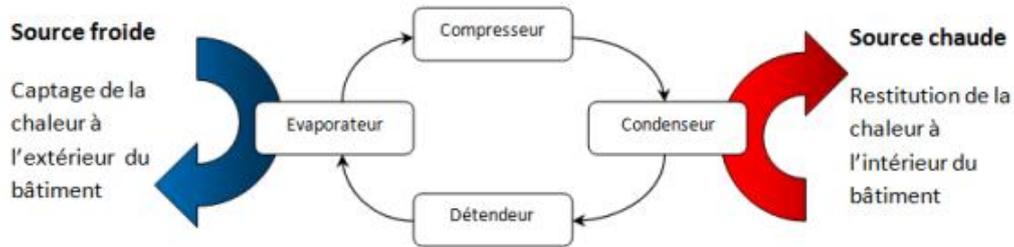
- PAC à compression Le compresseur des PAC à compression peut être alimenté soit par de l'électricité (PAC à compression électrique) soit par du gaz (PAC à moteur gaz). Le fonctionnement d'une PAC à compression est comparable à celui d'un réfrigérateur ménager.
- PAC à absorption Dans le cas des PAC à absorption, l'élévation de température et de pression ne se fait pas via un compresseur mais par l'intermédiaire d'un brûleur à gaz. Les échanges de chaleur reposent, quant à eux, sur la réaction d'une solution composée d'un fluide frigorigène (ammoniac) et d'un absorbant (eau).

II. Principes de fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC) :

Une PAC est une machine thermodynamique qui puise la chaleur d'un milieu naturel appelé « source froide » (eau, air, sol) dont la température est inférieure à celle du local à chauffer. Elle transfère ensuite cette énergie au fluide caloporteur afin d'assurer le chauffage et souvent aussi la production d'eau chaude sanitaire. La chaleur prélevée au niveau de la

« Source froide » est captée par le fluide caloporteur au niveau de l'évaporateur. Le fluide change d'état et se transforme en vapeur. Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température. C'est au niveau du condenseur que la vapeur en se condensant transmet sa chaleur au milieu à chauffer. Puis la température du fluide s'abaisse fortement dans un détendeur le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur, le cycle peut recommencer. Il existe aujourd'hui des pompes à chaleur dites réversibles qui permettent de produire du chaud et du froid.

Pompe à chaleur



Réfrigérateur

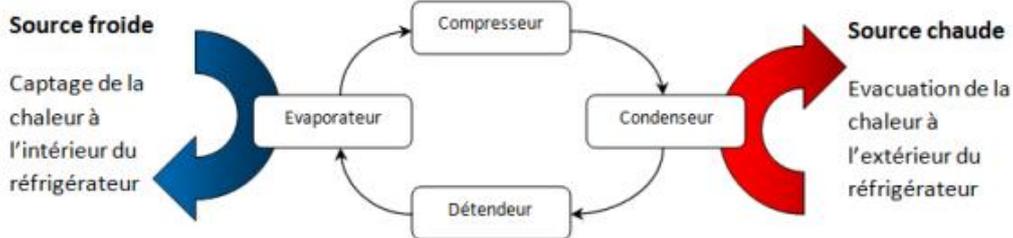


Figure 4.1. Principes de fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC)

III. Vanne d'inversion de cycle

III.1. Principe de fonctionnement

Une machine frigorifique réversible permet toute à fait de refroidir un local en été, cependant il doté en plus un dispositif permet d'inverser le cycle en hiver afin de chauffer le même local. Ce dispositif appelé Vanne d'inversion

Le principe de fonctionnement est basé sur un tiroir situé à l'intérieur de la vanne principale. En se déplaçant de gauche à droite ou de droite à gauche, il inverse les échangeurs. Le déplacement du tiroir est commandé par la petite électrovanne pilote.

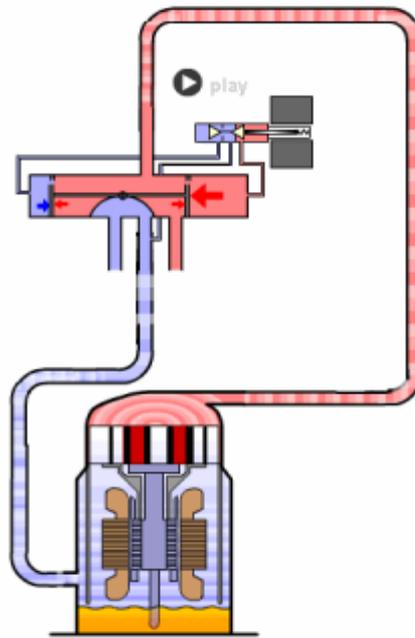


Figure 4.2. Principe de fonctionnement

III.2. Schéma fluïdique

Lorsque nous examinons le schéma de la vanne, nous constatons qu'elle est constituée d'une vanne principale à **4 voies** et d'une petite électrovanne pilote à **3 voies** montée sur le corps de la vanne principale. Nous remarquons que sur les 4 raccordements de la vanne principale, 3 sont placés côte à côte (l'aspiration du compresseur est toujours raccordée sur celui du milieu) et que le quatrième raccordement se trouve seul de l'autre coté (on y raccorde toujours le refoulement du compresseur

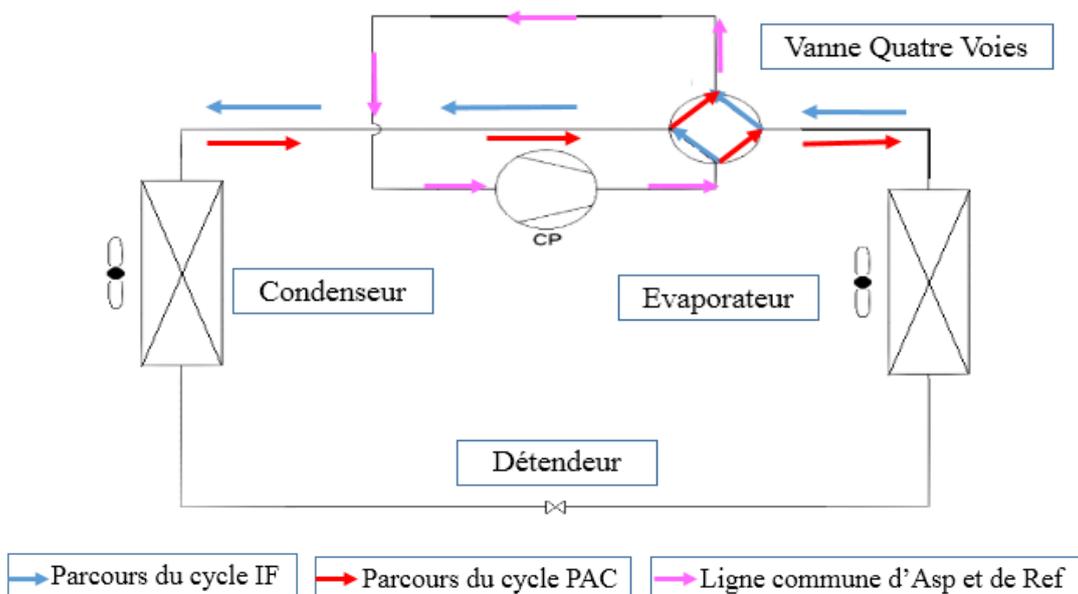


Figure 4.3. Schéma fluïdique

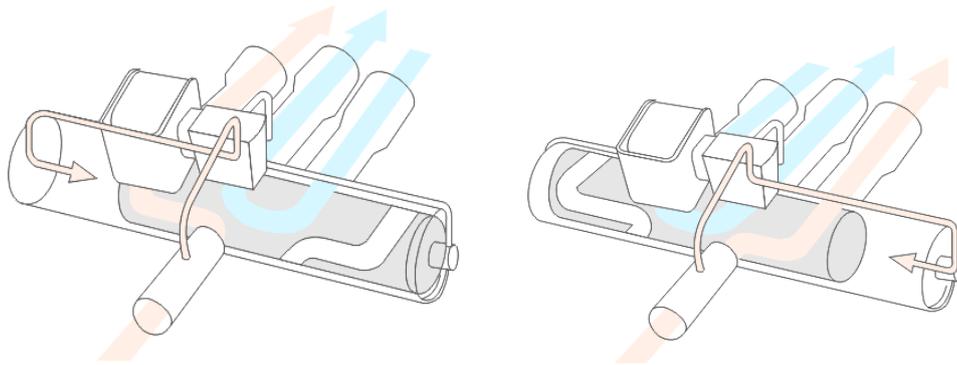


Figure 4.4. Image d'un Electrovanne

IV. Différents types de pompes à chaleur

IV.1. Pompe à chaleur Air /Air

L'air extérieur représente une source d'énergie inépuisable et ne pose aucun problème en temps que source froide. Il est gratuit et sans contrainte d'utilisation



Figure 4.5. Pompe à chaleur Air /Air

IV. 2. Pompe à chaleur Sol /Air en captage horizontal

L'énergie contenue dans le sol est facilement exploitable, En enfouissant un capteur à environ 1m de profondeur en terre, l'énergie peut être facilement récupérée



Figure 4.6. Pompe à chaleur Sol / Air en captage horizontal

IV.3. Pompe à chaleur Sol / Air avec sonde profonde

L'énergie contenue dans le sol est facilement exploitable, Avec une ou plusieurs sondes profondes jusqu'à 100m de forage

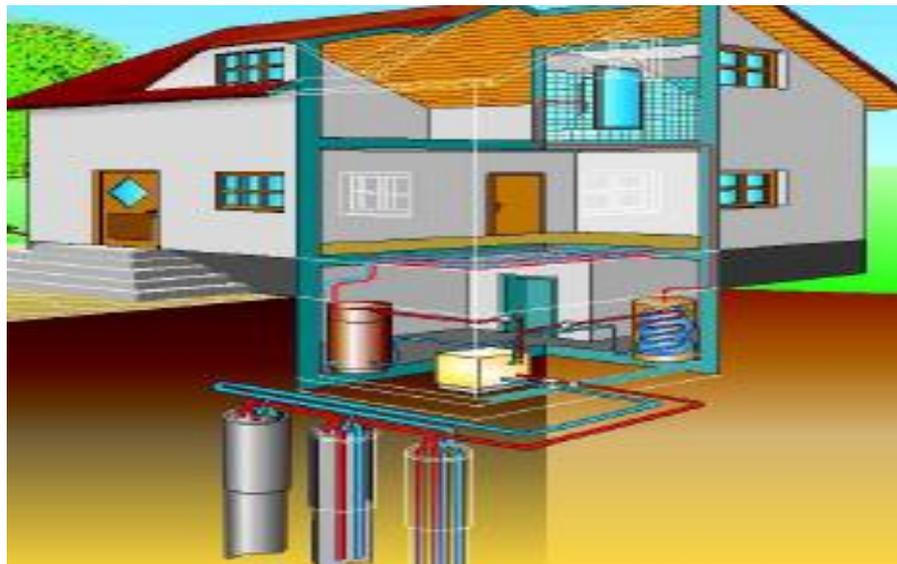


Figure 4.7. Pompe à chaleur Sol / Air avec sonde profonde

IV. 4. Pompe à chaleur en captage sur nappe d'eau

Un système de chauffage avec pompe à chaleur peut être installé en utilisant l'eau d'une nappe phréatique qui fournit une source froide à une température constante tout au long de l'année. On peut également puiser l'énergie dans un cours d'eau, une rivière, un lac.



Figure 4.8. Pompe à chaleur en captage sur nappe d'eau

V. Coefficient de performance

Le rapport entre la quantité de chaleur produite et l'énergie électrique consommée (par le compresseur) est le coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur. Il traduit la performance énergétique d'une pompe à chaleur en mode chauffage.

$$\eta = \frac{\text{chaleur fournie à la maison}}{\text{travail fourni à la PAC}} = \frac{|Q_c|}{W}$$

I. Vanne d'inversion

Sur le même schéma dessiner le parcours du fluide en mode froid et chaud avec deux couleurs différentes.

II.

CHAPITRE 05

Autre types de machines frigorifiques

Machine frigorifique à absorption

<i>Sommaire</i>	Page
<i>I. Introduction</i>	60
<i>II. Cycle de base des machines à absorption liquide</i>	61
<i>II.1. Principe de l'absorption-désorption</i>	61
<i>II.2. Machine à absorption utilisant NH₃/H₂O</i>	62
<i>II.2.1. Schéma de principe</i>	62
<i>II.2.2. Principe de fonctionnement</i>	63
<i>III. Comparaison des systèmes à Compression et à Absorption</i>	64

I. Introduction

Les machines frigorifiques à absorption liquide fonctionnent grâce à la faculté de certains liquides (absorbant), d'absorber (réaction exothermique) et de désorber (réaction endothermique) une vapeur (fluide frigorigène). Elles utilisent également le fait que la solubilité de cette vapeur dans le liquide dépend de la température et de la pression. Ainsi, ces machines utilisent comme fluide de travail un mélange binaire, dont l'un des composants est beaucoup plus volatil que l'autre, et constitue le fluide frigorigène. Deux couples sont principalement utilisés :

- ✓ Eau / Bromure de Lithium ($H_2O/LiBr$), l'eau étant le fluide frigorigène,
- ✓ Ammoniac / Eau (NH_3/H_2O), l'ammoniac étant le fluide frigorigène

L'absorption du frigorigène par la solution absorbante est exothermique ce qui impose l'usage d'un échangeur de chaleur pour le refroidissement de la solution absorbante.

Les systèmes à absorption ont été les premières machines frigorifiques industriellement opérationnelles. Le développement des systèmes à compression les a confinés dans des applications bien précises. Selon l'architecture utilisée des machines à absorption, il est distingué :

- Des systèmes continus dont la production de froid est continue. L'usage de pompes de circulation des solutions absorbantes impose la consommation d'énergie mécanique. Selon l'architecture, on peut distinguer :
 - Les systèmes mono étagés à générateur *simple* effet.
 - Les systèmes mono étagés à générateur *double* effet.
 - Les systèmes *poly* étagés.

C'est la famille des systèmes à absorption continus qui représente la plus importante partie des systèmes thermo frigorifiques intégrés actuellement utilisés.

- Des systèmes intermittents qui permettent d'éviter la pompe de circulation. Cette famille est tout à fait marginale.
- Des systèmes continus à absorption- diffusion utilisant, dans le circuit interne du système, en plus du couple frigorigène- absorbant, un gaz qui n'intervient nullement dans le processus de production du froid mais qui compense, par sa présence, la

différence de pression du frigorigène entre les parties froides et chaudes de la machine, réalisant un circuit pratiquement isobare. La pompe de circulation des solutions n'a alors à vaincre que de faibles différences de pressions de nature hydrostatique.

II. Cycle de base des machines à absorption liquide

II.1. Principe de l'absorption-désorption

Schématiquement, une installation à absorption liquide comporte les différents éléments représentés dans la figure II.1. Un système à absorption comprend tout d'abord, comme les machines à compression de vapeur, un ensemble condenseur / détenteur / évaporateur, dans lequel ne transite que le frigorigène pur. Cet ensemble est connecté à la partie "chimique" du procédé, chargée de modifier l'état du frigorigène évaporé pour le rendre condensable à la température de l'environnement

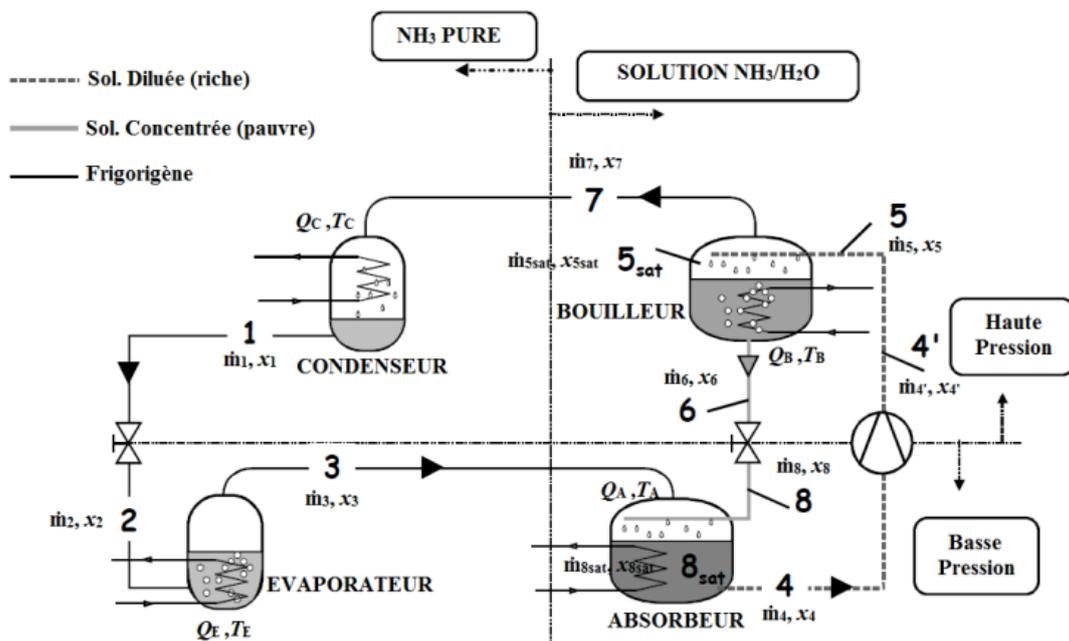


Figure 5.1. Structure d'une machine frigorifique à absorption

La base de son fonctionnement réside dans les propriétés des solutions binaires, dont l'équilibre liquide/vapeur : à pression constante, la température de saturation évolue avec la composition de la solution liquide.

Ce comportement est responsable du phénomène de glissement apparu avec l'emploi de mélanges frigorigènes dans l'industrie frigorifique.

Pour les systèmes à absorption, on exprime ce même comportement d'une manière différente : à pression constante, la composition de la solution évolue avec la température. En effet, une augmentation de la température provoque une concentration de la solution et qu'inversement, son abaissement conduit à une dilution.

D'autre part, les deux constituants des mélanges utilisés présentent une différence de volatilité telle, que la vapeur saturante est pratiquement pure en composant volatil. Les opérations isobares de concentration et de dilution provoquent donc respectivement la désorption et l'absorption d'une vapeur qui jouera ainsi le rôle de frigorigène.

II.2. Machine à absorption utilisant NH₃/H₂O

Cette machine utilise la propriété que présente l'eau à basse température d'absorber l'ammoniac (1000 fois son volume à 0°C) et de libérer par chauffage la presque totalité du gaz absorbé (à 100°C) Ces vapeurs d'ammoniac une fois condensées pourront donc nous assurer la production de froid désirée dans un évaporateur.

II.2.1. Schéma de principe

Le schéma de principe des machines frigorifiques à absorption est le même que celui des machines à compression mécanique :

- ✓ Vaporisation à basse température,
- ✓ Condensation à haute température.

La machine est constituée par les éléments suivants (figure 5.2) :

- Bouilleur
- Condenseur
- Evaporateur
- Absorbeur
- Echangeur de chaleur
- Pompe
- Deux détendeurs

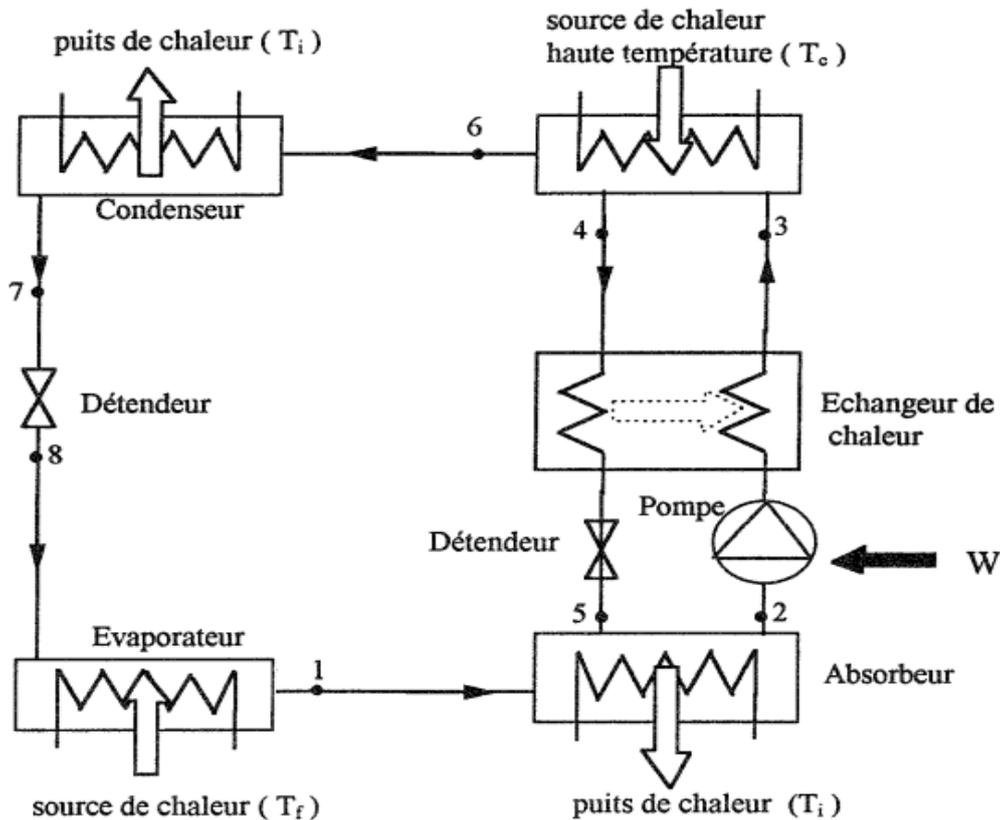


Figure 5.2. Schéma de principe

II.2.2. Principe de fonctionnement

➤ **Bouilleur :**

En se référant à la figure (5.1), la solution diluée [riche en frigorigène] (point 5) y reçoit la quantité de chaleur Q_B à une température T_B , ce qui provoque la désorption d'une partie du frigorigène dissous dans la solution. Le bouilleur produit ainsi une vapeur de frigorigène (point 7) et une solution concentrée [pauvre en frigorigène] (point 6). Cet organe effectue une concentration trajet (5-6) du sorbant (X_{H_2O}) ou un appauvrissement en frigorigène (X_{NH_3}) suivant la convention choisie.

➤ **Condenseur :**

Composant analogue à celui des machines à compression de vapeur. C'est la température T_C du fluide caloporteur alimentant le condenseur qui fixe la température de condensation et donc la pression dans l'ensemble bouilleur/condenseur. La condensation du frigorigène nécessite le rejet de la chaleur de condensation Q_C à la température T_C . Le trajet (7-1) correspondant comprend une phase de désurchauffe, la condensation ainsi qu'un éventuel sous refroidissement.

➤ **Evaporateur :**

À la sortie du condenseur (point 1), le frigorigène liquide subit un laminage à travers le détendeur (1-2), puis s'évapore, produisant l'effet frigorifique Q_E . La température d'évaporation, et par suite la pression dans l'ensemble évaporateur/absorbeur est fixée par la température T_E de la source froide (milieu à refroidir). Notons la présence d'une éventuelle surchauffe en sortie de cet échangeur.

➤ **Absorbeur :**

La vapeur issue de l'évaporateur (point 3) y rencontre la solution concentrée [pauvre] provenant du bouilleur via le détendeur (point 8). Elle est absorbée par cette solution, qui s'enrichit en frigorigène. La chaleur Q_A dégagée par cette transformation exothermique est évacuée par un fluide caloporteur à la température T_A . En sortie d'absorbeur (point 4), on obtient ainsi une solution diluée [riche en frigorigène]. Ce composant effectue donc une dilution trajet (8-4) du sorbant (X_{H_2O}) ou un enrichissement en frigorigène (X_{NH_3}) suivant la convention choisie.

III. Comparaison des systèmes à Compression et à Absorption

<u>Systèmes à compression</u>	<u>Systèmes à absorption</u>
<p style="text-align: center;"><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none">* très bon coefficient de performance* simplicité du cycle et de machine* bonne sécurité d'emploi, mais avec les frigorigènes actuels qui sont mis en accusation* variation de puissance frigorifique facile à mettre en oeuvre <p style="text-align: center;"><u>Inconvénients</u></p> <ul style="list-style-type: none">* l'énergie consommée par ces systèmes est coûteuse* utilisation d'une machine tournante entraînant des bruits et maintenance fréquente* problèmes posés par certains frigorigènes, polluants, dont la production est bannie par le protocole de Montréal.	<p style="text-align: center;"><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none">* consomme essentiellement de l'énergie calorifique qui peut être récupérée d'un autre système* ne nécessite que peu de machines tournantes* peu de maintenance et grande longévité du matériel <p style="text-align: center;"><u>Inconvénients</u></p> <ul style="list-style-type: none">* coefficients de performance modestes* une grande puissance thermique est à évacuer vers l'extérieur* étanchéité de la machine pour éviter l'intrusion de gaz incondensables* problème de cristallisation des absorbants

Références

1. H. Recknagel, E-R. Schramek, E. Sprenger, « Génie climatique », Dunod,2013.
2. W. Maake, H.-J. Eckert, J-L. Cauchepin, « Le Pohlmann - Manuel technique du froid », PYC Livres.
3. J. Desmons, « Aide-mémoire froid industriel », Dunod. 2^{ème} Edition, 2010
4. Dick Wirz, « Commercial Refrigeration for Air Conditioning Technicians », 2^{ème} Edition,2010
5. R. Trott and T. Welch, « Refrigeration and Air-Conditioning,3^{ème} dition,1999
6. F.Meunier, D.Mugnier,« La climatisation solaire. Thermique ou photovoltaïque », DUNOD, 2013.
7. F. Meunier, P. Rivet, M-F. Terrier, « Froid industriel - 2ème édition », DUNOD, 2010.
8. Horst Herr, « Génie énergétique et climatique Chauffage, froid, climatisation », Dunod Tech 2014.