

## Chapitre IV : Organes de la machine frigorifique

La machine frigorifique à compression de vapeur est une machine qui permet de produire le froid ou refroidir une source froide. Cette opération nécessite une énergie. La compression de la vapeur du gaz frigorigène permet d'absorber l'énergie nécessaire sous forme de travail.

La pompe à chaleur permet de délivrer de la chaleur à la source chaude, son principe de fonctionnement est le même que la MF.

La machine se compose de 4 organes : compresseur, condenseur, détendeur et évaporateur.

### 1- Le compresseur :

Pour la compression de vapeur, il existe deux grands types : les compresseurs volumétriques et les compresseurs centrifuges ou turbocompresseurs.

1-1 Compresseurs volumétriques : la compression est obtenue par réduction d'un volume dans une chambre de compression, c'est la technologie la plus répandue dans les MF. On distingue les compresseurs à pistons, les compresseurs rotatifs : à palettes, à spirale ou à vis .

1-2 Turbocompresseurs : c'est un compresseur centrifuge ou turbomachine qui communique l'énergie au fluide frigorigène grâce à des roues. La compression se fait grâce à la force centrifuge. Utilisés essentiellement dans les installations à grande puissance.

Type	Pistons	Rotatif	Spirales	Vis	Turbo
Volume balayée (m <sup>3</sup> /h)	Jusqu'à 1500	de 350 à 5600	Faible de 10 à 200	de 500 à 5000	De 800 à 50000
Vitesse de rotation (tr/mn)	Jusqu'à 1800	Jusqu'à 4000	Jusqu'à 10000	Jusqu'à 3000	Jusqu'à 30000
Taux de compression	2 à 10	5 à 6	Environ 5	20 à 30	3.5 à 4
Applications	Ménager Commercial Industriel	Commercial Industriel	Commercial	Industriel	Industriel

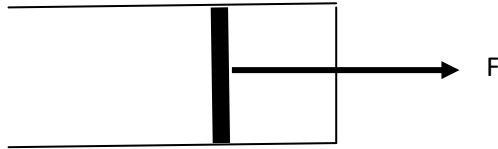
Compresseur à pistons :

la compression d'une machine frigorifique est isentropique ( $S = \text{cte}$ ) en théorie ( pas de frottements : transformation adiabatique réversible) . le compresseur réel perd de l'énergie à cause des frottements.

Pour un gaz parfait le travail isentropique est donné par la relation :

- le travail volumétrique (ou de transvasement)  $W$  lié à l'application de la force de pression sur l'enveloppe par le piston:

$$\delta W = -pdV \quad (V : \text{volume du gaz}),$$



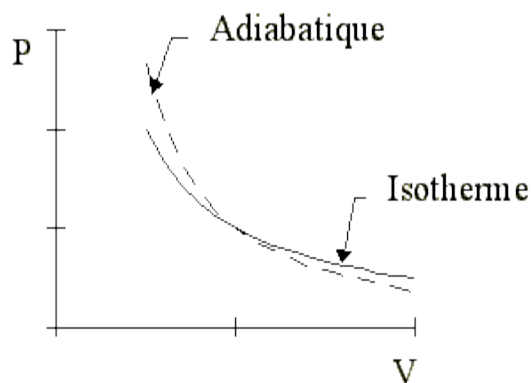
- le travail de frottement

**Wf** : c'est l'énergie mécanique dissipée par frottements.

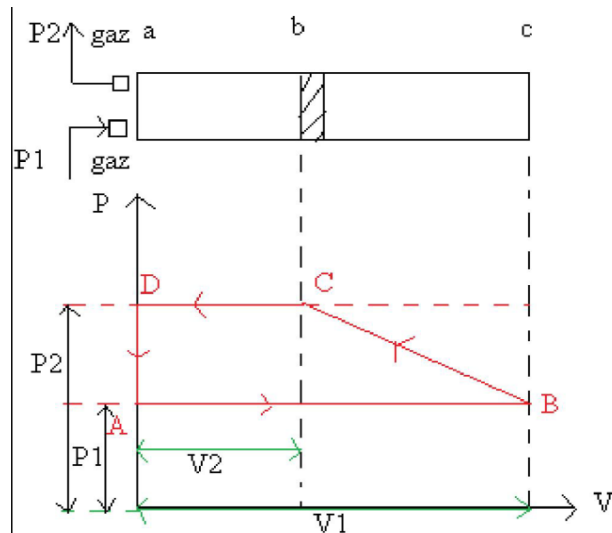
### Transformation adiabatique réversible (isentropique)

Un gaz parfait subit une tr. adiabatique de l'état 1 ( $P_1, V_1, T_1$ ) à l'état 2 ( $P_2, V_2, T_2$ ) :

- équation d'état du gaz parfait :  $PV = nRT$
- équation de l'adiabatique ( $Q = 0$ ): 1<sup>ère</sup> loi de Laplace :  $pV^\gamma = \text{Cte}$ ,  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$
- travail :  $\delta W = dU - \delta Q \Rightarrow W_{12} = \Delta U = nC_v (T_2 - T_1) = \frac{nR}{\gamma - 1} \Delta T = -\frac{1}{\gamma - 1} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$
- entropie :  $dS = 0 \Rightarrow \Delta S = 0$  (entropie constante : une adiabatique sans frottement est une isentropique)



Le travail dans un compresseur théorique utilise la formulation du travail et la nature de la compression comme suit :



### Fonctionnement du compresseur alternatif

TR 1 : admission du gaz dans le cylindre à pression  $P_1$  jusqu'au volume  $V_1$  : travail d'aspiration dû à la dépression dans le cylindre :

$$W_{asp} = - P_1 \cdot V_1$$

TR 2 : compression du gaz jusqu'à  $P_2$ , compression isotherme ou adiabatique :

$$- \text{adiabatique : } W_{12} = -\frac{1}{\gamma-1} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

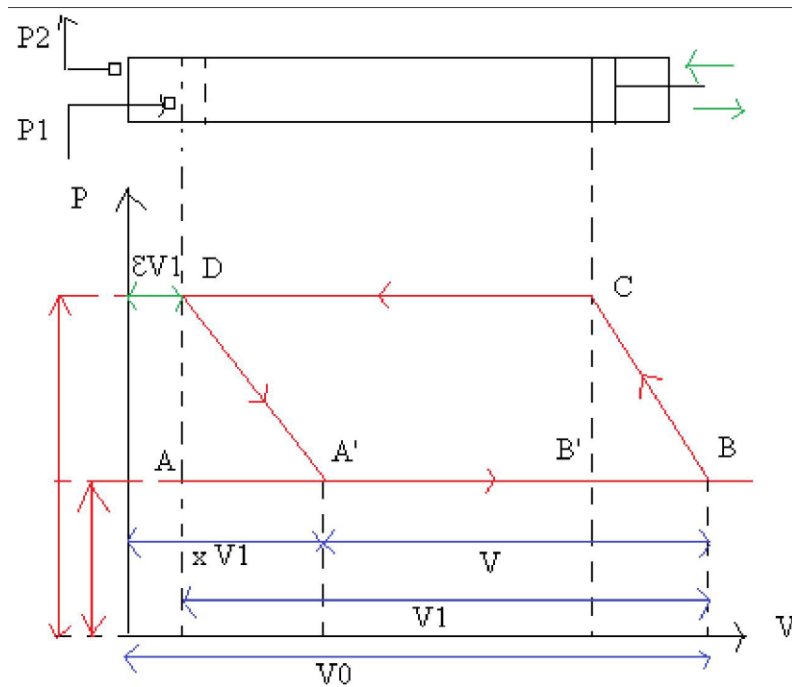
TR3 : échappement du gaz comprimé à la pression  $P_2$  jusqu'au volume  $V_2$ , le travail de refoulement est ainsi égale à :

$$W_{ref} = + P_2 \cdot V_2$$

Le travail total de compression sera :  $W = W_{asp} + W_{12} + W_{ref}$

Dans le cas d'un compresseur réel, on ne peut négliger l'espace mort dans le cylindre, la transformation DA n'est plus isochore et le volume réellement comprimé est inférieur.

De ce fait, il sera introduit un rendement volumétrique entre le volume comprimé réellement et le volume du cylindre.



Compresseur réel

## 2- Détendeur

Les détendeurs sont des dispositifs assurant la détente du fluide frigorigène issu du condenseur afin d'en diminuer la pression et le renvoyer vers l'évaporateur.

Les détendeurs pour évaporateurs à détente sèche se regroupent en trois types :

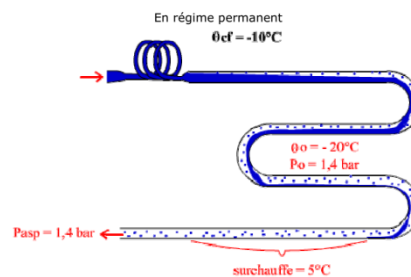
- les tubes capillaires ou détendeurs capillaires
- les détendeurs thermostatiques
- les détendeurs électroniques

### a/ les tubes capillaires

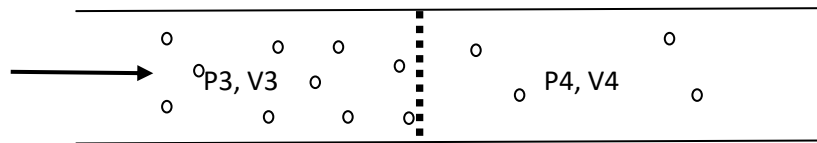
Tubes de cuivre de longueur entre 1 et 7m, dont le diamètre est entre 0.6 et 2mm.

Son fonctionnement assure la chute de pression souhaitée par perte de charge à cause de la diminution de la section. Utilisé surtout pour les faibles puissances

Fonctionnement :



Principe de fonctionnement d'un détendeur capillaire :



Le liquide pénètre dans le canal, les pores du matériau ne permettent pas le passage des molécules, en plus l'obstacle augmente les frottements donc la pression diminue.

$P_4 < P_3$  donc il y a détente du liquide qui se transforme en mélange liquide + vapeur.

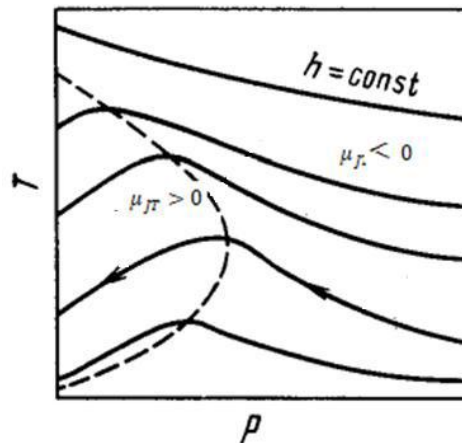
La courbe d'inversion

Le coefficient de Joule- Thompson est :  $\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h$

$$\mu_{JT} = 0 \text{ pour un gaz parfait}$$

$$\mu_{JT} < \text{ou} > 0 \text{ pour un gaz réel}$$

Ca dépend de la courbe d'inversion : à l'intérieur de la courbe d'inversion ( en pointillé) la détente provoque le refroidissement du gaz

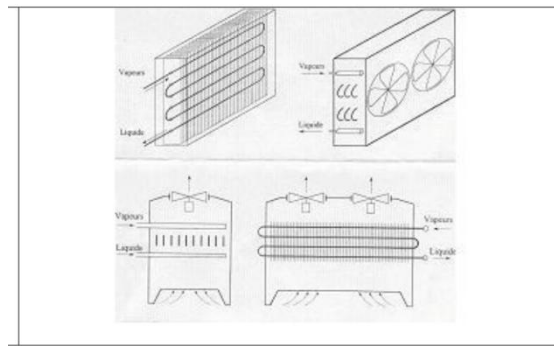


Courbe d'inversion

### 3- Condenseur

Un condenseur est un échangeur de chaleur assurant la condensation du fluide frigorigène: on distingue les condenseurs à air ou les condenseurs à eau.

	Avantages	Inconvénients
Condenseurs à air	Air disponible en quantité illimitée Entretien simple et réduit	Coefficients globaux d'échange thermique relativement faibles  Plus imposants et plus lourds  Températures de condensation élevées dans les pays chauds
Condenseurs à eau	Coefficients globaux d'échange thermique plus élevés  Plus compacts et moins encombrants à puissance égale  Températures de condensation stables et de bas niveau  Fonctionnement moins bruyant  Possibilité de récupération d'énergie	Gaspillage d'eau pour les condenseurs à eau perdue  Nécessité de mise en place d'un système de refroidissement de l'eau



Convection forcée de l'air

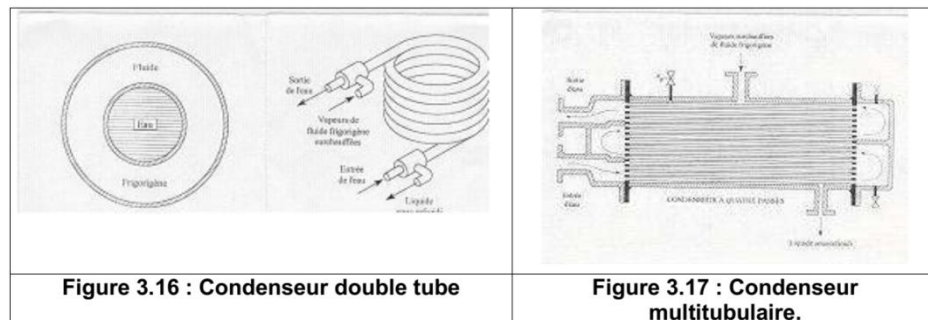
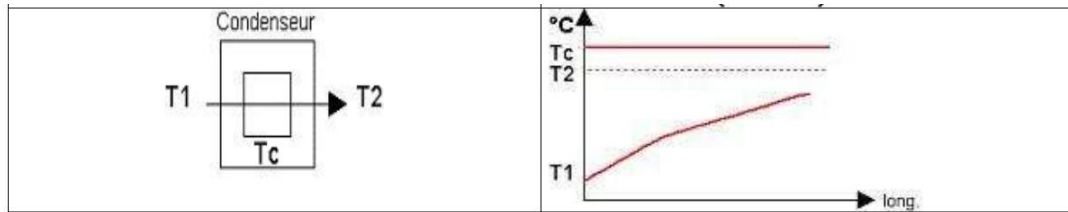


Figure 3.16 : Condenseur double tube

Figure 3.17 : Condenseur multitubulaire.

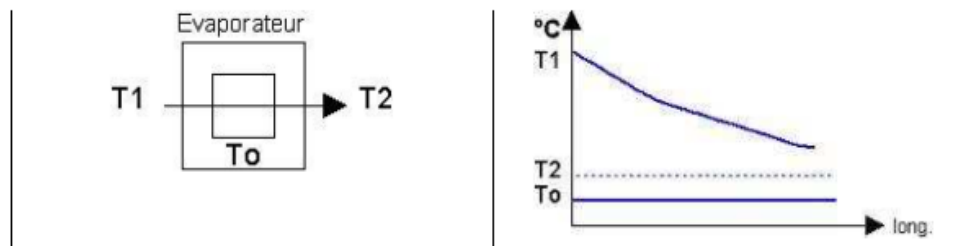
## Circuit à eau

Dans le condenseur la température du fluide frigorigène reste constant  $T_c$  et la température du fluide veant de la source chaude augmente de  $T_1$  à  $T_2$ .



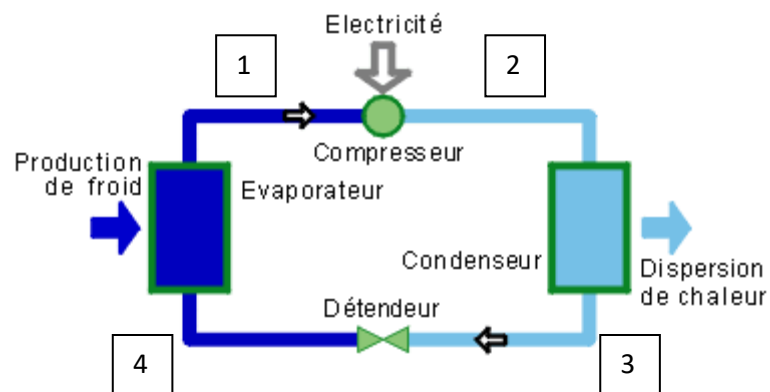
#### 4- Evaporateur

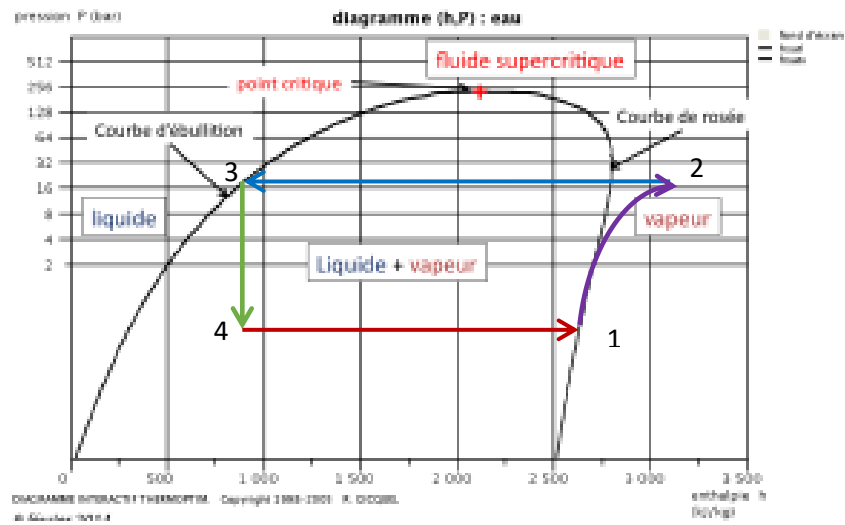
Un évaporateur est un échangeur de chaleur assurant la vaporisation du fluide frigorigène. Il est similaire au condenseur mais agit contrairement à celui-ci.



Le fluide dans l'évaporateur reste à température constante  $T_0$  ou  $T_F$  alors que le fluide venant de la source froide refroidit de  $T_1$  à  $T_2$ .

Une MF est essentiellement composée de 4 organes :





Cycle théorique / diagramme de Mollier

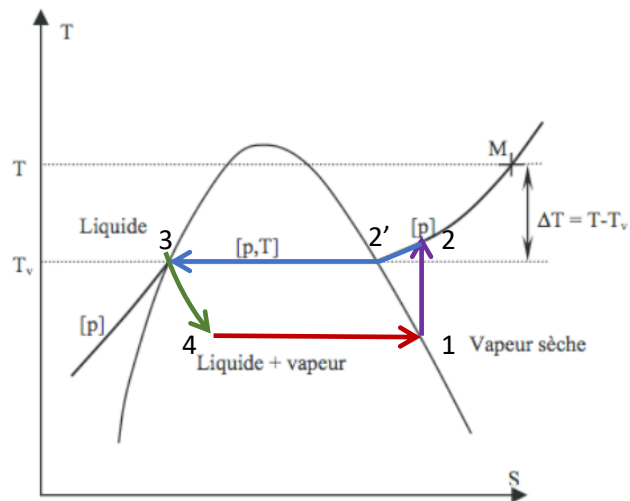


Diagramme entropique

L'équation de conservation de l'énergie par kg de fluide s'écrit pendant la compression:

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + u_{i1} = \frac{V_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + u_{i2} \pm W_t \pm Q$$

$$\frac{p}{\rho} + u_i = h \text{ c'est l'enthalpie}$$

### TR 1-2 La compression est isentropique

La compression adiabatique  $Q = 0$ , le débit et section sont constants donc  $\frac{V_1^2}{2} = \frac{V_2^2}{2}$

Donc  $W_t = W_c = h_2 - h_1 > 0$  car le travail est absorbé par le fluide, c'est un gain.



### TR 2-3 La condensation est isotherme isobare, p et T constantes

la condensation : L'équation de conservation de l'énergie par kg dans le condenseur s'écrit :

$$\frac{V_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + u_{i2} = \frac{V_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho} + u_{i3} \pm W_t \pm Q$$

Dans le condenseur il n'ya pas de travail, donc l'équation devient :

$$h_3 - h_2 = Q_c < 0$$

### TR 3-4 La détente est isenthalpique

La détente : L'équation de conservation de l'énergie par kg de fluide dans le détendeur s'écrit :

$$\frac{V_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho} + u_{i3} = \frac{V_4^2}{2} + \frac{p_4}{\rho} + u_{i4} \pm W_t \pm Q$$

Le tube capillaire n'a ni travail ni chaleur donc

$$h_3 = h_4$$

### TR 4-1 La condensation est isotherme isobare, p et T constantes la

vaporisation : L'équation de conservation de l'énergie par kg de fluide dans l'évaporateur s'écrit.

$$\frac{V_4^2}{2} + \frac{p_4}{\rho} + u_{i4} = \frac{V_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + u_{i1} \pm W_t \pm Q$$

Dans l'évaporateur il n'ya pas de travail, donc l'équation devient :

$$h_1 - h_4 = Q_0 = Q_F > 0$$

Le bilan du cycle 1-2-3-4-1 s'écrit

$$\oint dh = W + Q = \Delta h \Big|_1^1 = \Delta h_{cycle} = 0$$

Donc  $W_c + Q_F + Q_c = 0$  donc :  $-(Q_F + Q_c) = W_c$

en tenant en compte du signe on a

$|Q_c| - |Q_F| = |W_c|$  car  $Q_c$  est négative alors que  $W_c$  et  $Q_F$  sont positives

### Efficacité frigorifique

L'efficacité frigorifique est calculée pour la MF :

$$E = \left| \frac{Q_F}{W_c} \right| = \frac{Q_F}{W_c} > 1$$

### Coefficient de performance

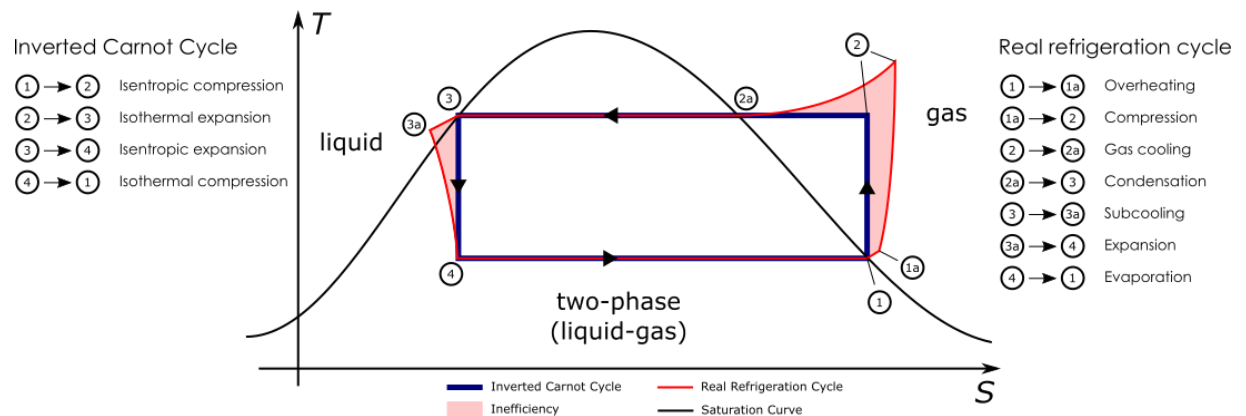
Le coefficient de performance d'une pompe à chaleur est :

$$COP = \left| \frac{Q_c}{W_c} \right| = \frac{|Q_c|}{W_c} > 1$$

Remarque :  $COP - E = 1$

### Rendement du cycle frigorifique

On compare le cycle au cycle de CARNOT inverse ( cycle en bleu ) : deux isothermes et deux isentropiques. C'est le cycle idéal des machines frigorifiques et pompes à chaleur.



L'efficacité de Carnot est :  $E_{Carnot} = \left| \frac{Q_F}{W_C} \right| = \frac{T_F}{T_C - T_F}$

Le coefficient de performance de Carnot  $COP_{Carnot} = \left| \frac{Q_c}{W_c} \right| = \frac{T_c}{T_c - T_F}$

Pour les machines frigorifiques et PAC on, les compare au cycle idéal inverse de carnot et cela en calculant ce qu'on appelle le rendement de la machine :

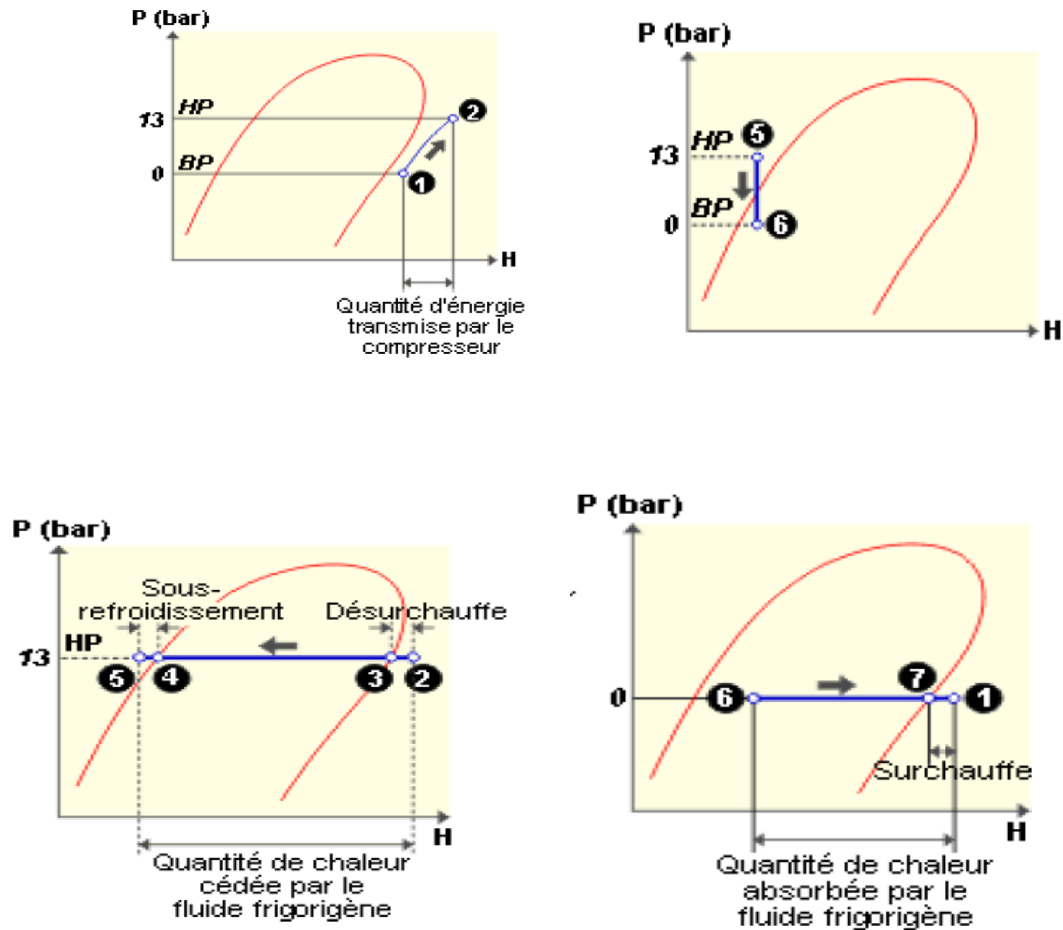
Le rendement d'une MF est :  $\eta_{MF} = \frac{E}{E_{Carnot}} < 1$

Le rendement d'une PAC est :  $\eta_{PAC} = \frac{COP}{COP_{Carnot}} < 1$

- On peut améliorer le cycle théorique pour augmenter la production de froid par :

## La surchauffe de la vapeur et le sous refroidissement du liquide

Sur le diagramme des frigoristes ( de Mollier) logp-h :



2-3 et 4-5 sont des opérations supplémentaires au cycle théorique : c'est la désurchauffe de la vapeur ( 2-3 ) et le sous refroidissement du liquide ( 4-5)

Avec désurchauffe et sous refroidissement :

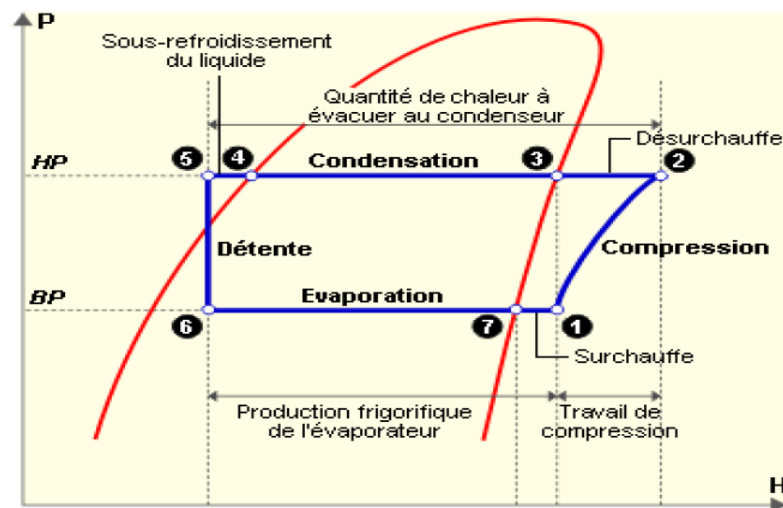
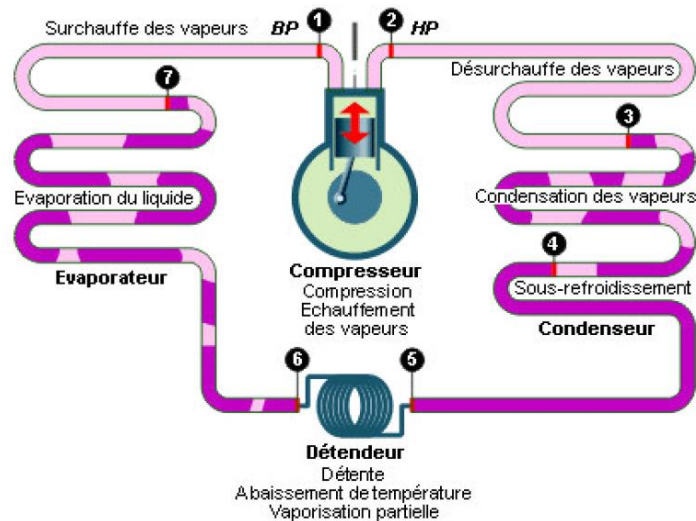
$$Q_C = h_5 - h_2$$

7-1 est une opération supplémentaire par rapport au cycle théorique , c'est la surchauffe de la vapeur saturée.

Avec surchauffe de la vapeur 7-1 :

$$Q_F = h_1 - h_6$$

le cycle global de la machine ci-dessous est donné par :



Sur le diagramme T-S le cycle est

1-2 : Compression isentropique  
 $S_1 = S_2$   
 2-3 : désurchauffe des vapeurs à pression constante ( $p_3 = p_2$  et  $T_3 < T_2$ )  
 3-4 : condensation des vapeurs à  $p_3 = p_4$  et  $T_3 = T_4$  ( $p = \text{cte}$  et  $T = \text{cte}$ )  
 4-5 : sous refroidissement du liquide à pression constante ( $p_5 = p_4$  et  $T_5 < T_4$ )  
 5-6 : détente isenthalpique ( $h_5 = h_6$ )  
 6-7 : vaporisation du mélange L+V à pression et température constantes ( $p_6 = p_7$  et  $T_6 = T_7$ )  
 7-1 : surchauffe des vapeurs à pression constante ( $p_7 = p_1$  et  $T_1 > T_7$ )

