

Chapitre 2 : Cycle thermodynamique d'une machine à compression de vapeur

2.1 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

2.1.1 Le diagramme (T, S)

Les courbes iso-paramétriques de la figure 3 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 inclinées dans le sens des entropies croissantes
- Les isotitriques passent toutes par le point critique
- 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

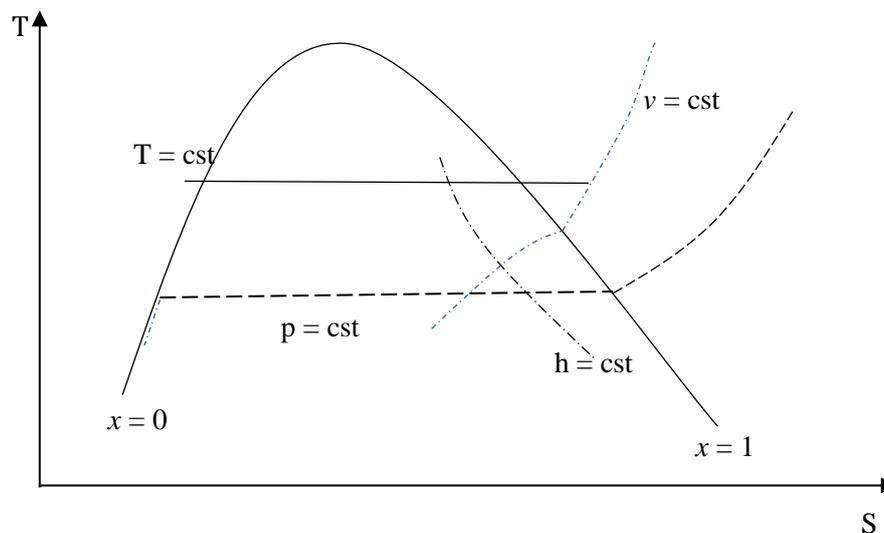


Figure 3 – Courbes paramétriques du diagramme (T, S)

2.1.2 Le diagramme (P, h)

Les courbes iso-paramétriques de la figure 4 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

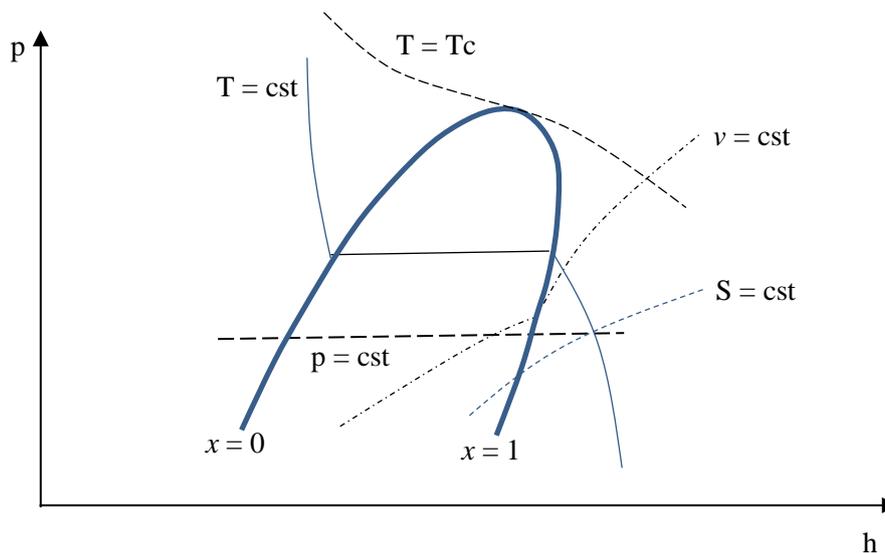


Figure 4 – Courbes paramétriques du diagramme (P, h)

2.3 Cycle fondamental de compression

Il existe des cycles à compression à un étage de pression ou multi-étages, des cycles de compression utilisant un seul fluide frigorigène pur ou un mélange de plusieurs fluides frigorigènes.

On utilise un étage de compression lorsque les températures de fonctionnement ne sont pas trop basses, soit autour de -20°C , ou pour la plupart des pompes à chaleur, de tels systèmes sont extrêmement répandus.

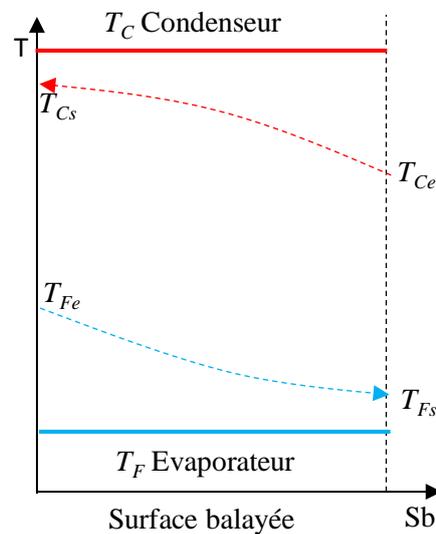
2.3.1 Le cycle théorique

La figure 5a indique le cycle fondamental à compression à un seul étage, la figure 5b montre l'évolution théorique des températures du fluide frigorigène ainsi que les fluides caloporteurs froid et chaud dans les échangeurs, l'installation à un étage est considérée comme la machine de base, simple et symétrique, elle comprend les éléments suivants :

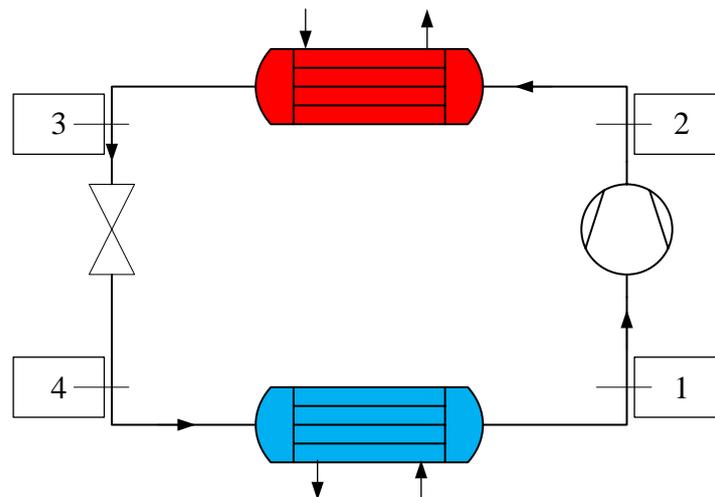
- L'évaporateur permet la vaporisation du fluide frigorigène, qui passe du point 4 au point 1, en absorbant la chaleur du fluide caloporteur en circulation à l'intérieur et se refroidit

de la température T_{Fe} à la température T_{Fs} , la vapeur qui sort de l'évaporateur est saturée, le phénomène de l'évaporation se produit à la température T_F , et qui correspond à la pression d'évaporation p_F , la température de l'évaporation reste inférieure aux températures de sorties et d'entrée du fluide caloporteur, on a $T_F < T_{Fs} < T_{Fe}$.

- Le compresseur aspire le fluide frigorigène du point 1 sous forme de vapeur saturée à la pression p_F venant de l'évaporateur et le comprime jusqu'à une pression de refoulement p_C pour l'injecter dans le condenseur au point 2, le fluide frigorigène est toujours sous forme de vapeur.



a) Evolution de la température dans les échangeurs



b) Circuit type

Figure 5 – Cycle théorique d'une machine frigorifique

- Le condenseur condense le fluide frigorigène en cédant la chaleur au fluide caloporteur, le fluide frigorigène entre dans le condenseur à l'état vapeur au point 2 et sort à l'état

liquide saturé au point 3, l'opération de condensation s'effectue à la température T_C correspondant à la pression de condensation p_C , le fluide caloporteur s'échauffe de la température T_{Ce} à la température T_{Cs} , on a $T_C > T_{Cs} > T_{Ce}$.

- Le détendeur détend le fluide frigorigène qui passe de la pression p_C à la pression p_F , ce même fluide étant à la sortie du condenseur à l'état liquide saturé au point 3 sort du détendeur à l'état de mélange de liquide et de vapeur au point 4 ; en sortant du détendeur le fluide frigorigène alimente l'évaporateur et le cycle reprend.

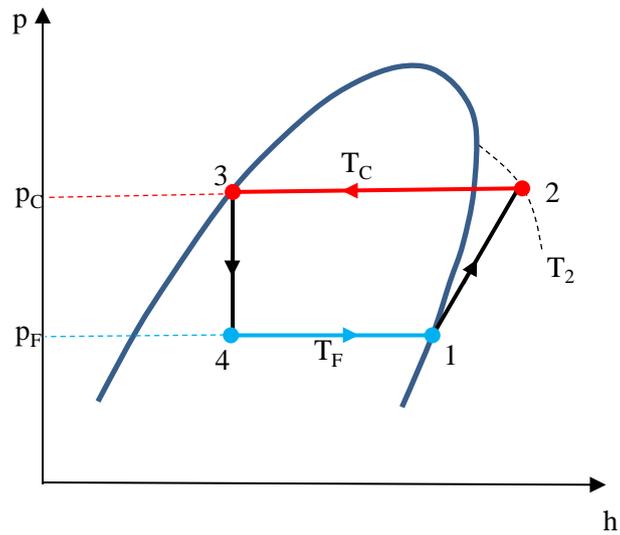
Le tracé du cycle théorique d'une machine frigorifique est indiqué dans la figure 6, les figures 6a et 6b montrent l'évolution des transformations en passant par les différentes étapes respectivement dans un diagramme (p, h) et un diagramme (T, S), le point 4 se situe sous la courbe de saturation puisqu'à la sortie du détendeur le fluide frigorigène est à l'état de mélange de liquide et de vapeur, ensuite le fluide subit les opérations suivantes successives :

- Du point 4 au point 1, le fluide est à l'intérieur de l'évaporateur où il absorbe de la chaleur sa pression p_F et sa température T_F restent constantes, dans le diagramme (p, h) l'évolution est indiquée par une ligne horizontale correspondant à une pression constante p_F de même dans le diagramme (T, S) la transformation suit une ligne horizontale parce que la température T_F reste constante, le point 1 se situe sur la courbe de saturation, la vapeur sortante de l'évaporateur est saturée.
- Du point 1 au point 2, le fluide est comprimé de la pression p_F à la pression p_C , la transformation est considérée adiabatique réversible, dans le diagramme (p, h), elle évolue selon une ligne isentropique, dans le diagramme (T, S) la transformation est une ligne horizontale puisqu'elle est à S constante.
- Du point 2 au point 3, le fluide frigorigène sortant du compresseur avec une température T_4 se refroidit jusqu'à la température T_C puis se condense, toute la transformation se fait à la pression p_C qui reste constante, l'évolution est visible sur une ligne horizontale dans le diagramme (p, h), dans le diagramme (T, S) la température décroît de T_4 jusqu'à T_C et qui reste constante pendant la condensation, au point 3 le fluide est à l'état liquide saturé et se situe sur la courbe de saturation.
- Du point 3 au point 4, le fluide subit une détente rapide de la pression p_C à la pression p_F , son enthalpie reste constante, elle est symbolisée par une ligne verticale dans le diagramme (p, h), si l'entrée du détendeur le fluide était à l'état liquide saturé, à sa sortie le fluide est un mélange de liquide et de vapeur avec un titre x en vapeur, le point 4 est le seul qui se trouve à l'intérieur de la courbe de saturation.

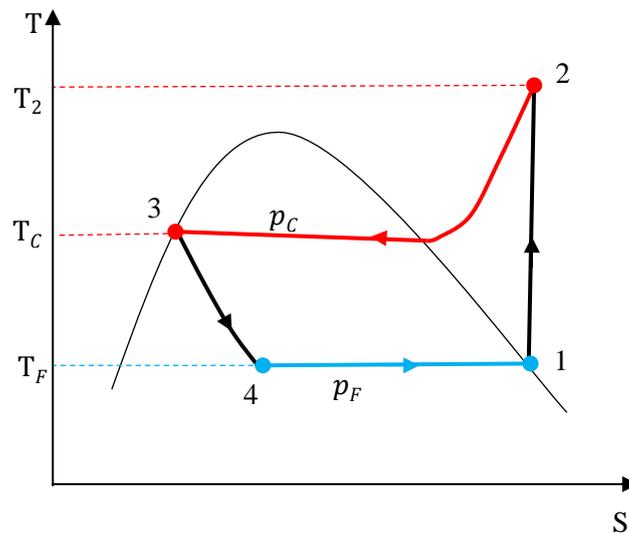
Un récapitulatif des points de fins de transformations sont regroupés dans le tableau 1, montrant l'état du fluide frigorigène, la pression et la température.

Tableau 1 : caractéristique du fluide aux points de transformation d'un cycle théorique

Point	Température	Pression	Etat du fluide
1	T_F	p_F	Vapeur saturée
2	T_4	p_C	Vapeur surchauffée
3	T_C	p_C	Liquide saturé
4	T_F	p_F	Mélange avec titre x



a) Diagramme (p, h)

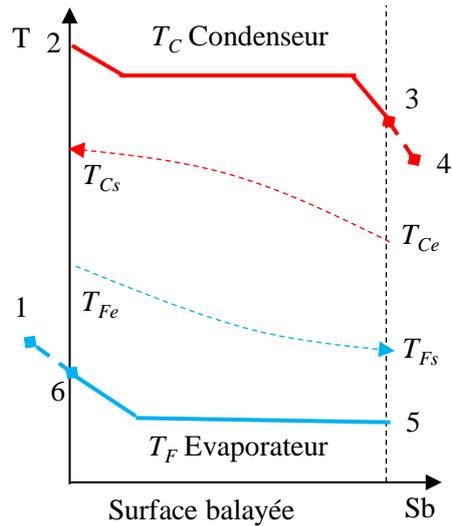


b) Diagramme (T, S)

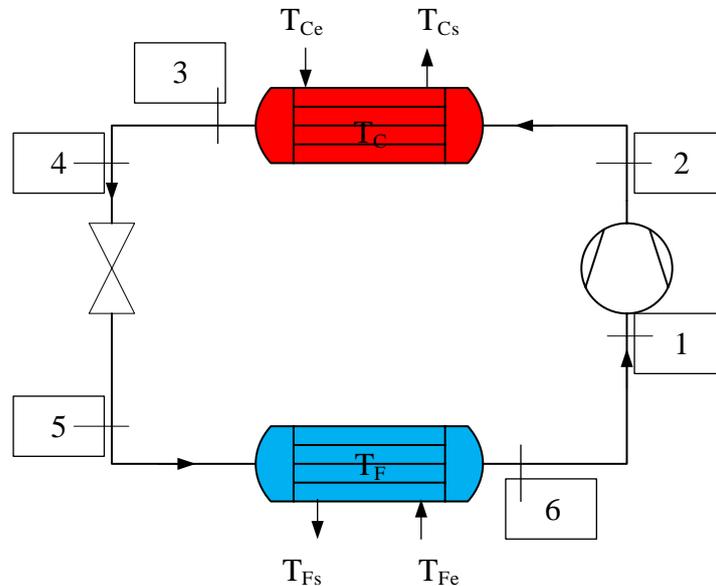
Figure 6 – Tracé du cycle théorique

2.3.2 Le cycle réel

Partant d'une machine frigorifique constituée des quatre éléments suscités à savoir, le compresseur, le condenseur, le détendeur, et l'évaporateur indiqué sur la figure 7a ; le tracé réel des températures aux niveaux des deux échangeurs diffère de celui d'un cycle théorique montré sur la figure 7b, les pertes de charges dues à la circulation du fluide frigorigène à l'intérieur des tuyauteries seront négligées.



a) Evolution de la température du circuit réel



b) Schéma du circuit réel

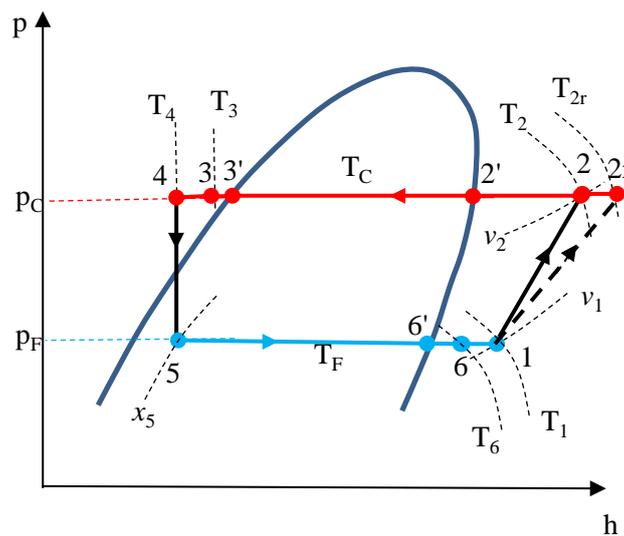
Figure 7 – Cycle réel d'une machine frigorifique

Les points caractéristiques du tracé d'un circuit du cycle réel d'une machine frigorifique sont portés sur la figure 8, la figure 8a montre le cycle sur un diagramme (p, h) et 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 :

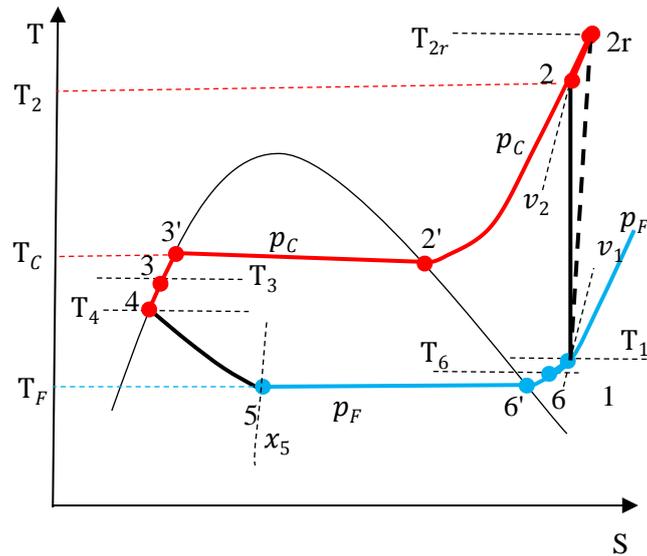
- Du point 5 au point 6, le fluide frigorigène est à l'intérieur de l'évaporateur sa pression p_C reste constante, il entre au point 5 à l'état de mélange et absorbe de la chaleur en se vaporisant, au point 6' il est à l'état vapeur saturé, entre les points 6' et 6 le fluide

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.



a) Diagramme (p, h)



b) Diagramme (T, S)

Figure 8 – Tracé du cycle réel

Un récapitulatif des points caractéristiques sont regroupés dans le tableau 2, montrant l'état du fluide frigorigène, la pression et la température.

Tableau 2 : caractéristique du fluide aux caractéristique d'un cycle réel

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

2.4 Bilan d'énergie

Pour une machine frigorifique typique composé de quatre éléments voire la figure 9 suivante schématisant le graphique et le cycle dans un diagramme (p, h), le bilan d'énergie a été fait en vue de connaître les entrées et les sorties de chaque composant séparément.

2.4.1 Compresseur

Le bilan énergétique s'écrit comme suit :

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{W} = \dot{m}_2 h_2 \quad (1-17)$$

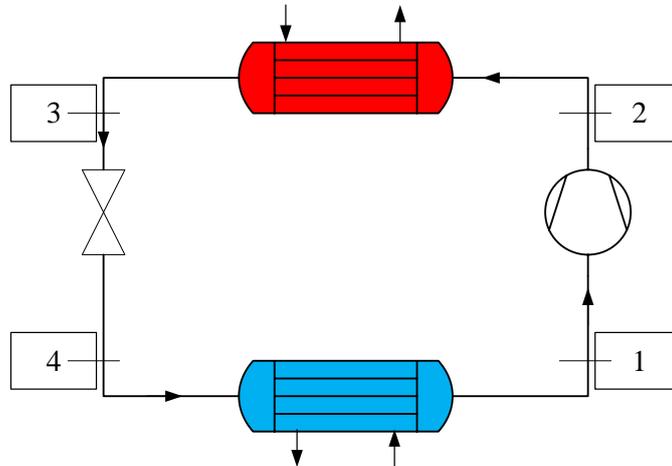
Le débit massique entrant et sortant reste le même, on divise par cette quantité et on obtient

$$h_1 + W = h_2 \quad (1-18)$$

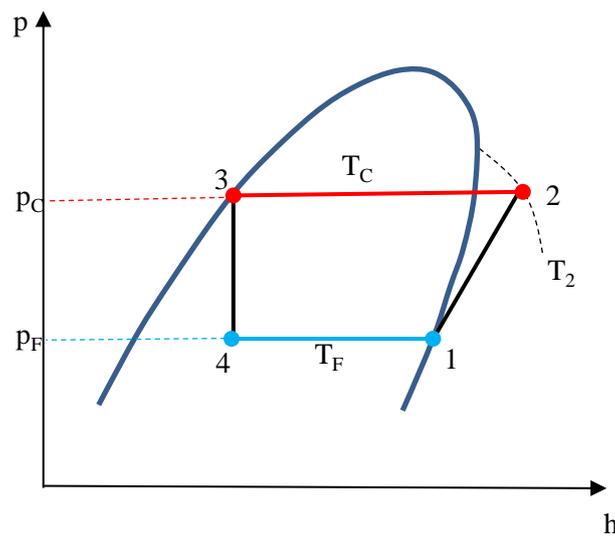
Ce qui se réduit à :

$$W = h_2 - h_1 \quad (1-19)$$

Le travail fourni par le compresseur se réduit à la variation d'enthalpie entre la sortie et l'entrée, lorsque la transformation est considérée comme isentropique.



a) Schéma de l'installation



b) Diagramme (p, h)

Figure 9 – Installation typique d'une machine frigorifique

De tous les composants d'une installation frigorifique, c'est le compresseur qui s'écarte le plus des paramètres théoriques, pour ce des rendements ont été introduits pour en tenir compte.

Le rendement volumétrique compare le volume réellement aspiré par rapport au volume balayé, il vaut :

$$\eta_v = \frac{\dot{V}_{asp}}{\dot{V}_b} \quad (1-20)$$

Le rendement isentropique compare la variation d'enthalpie d'une compression isentropique par rapport à une variation d'enthalpie réellement subie :

$$\eta_{is} = \frac{\Delta h_{is}}{\Delta h_r} \quad (1-21)$$

2.4.2 Condenseur

Le bilan est :

$$\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{Q}_C \quad (1-22)$$

On divise par le débit massique, on obtient

$$h_2 = h_3 + Q_C \quad (1-23)$$

Ce qui donne :

$$Q_C = -(h_3 - h_2) \quad (1-24)$$

La quantité de chaleur échangée par le condenseur est cédée par le fluide frigorigène au milieu extérieur.

2.4.3 Détendeur

Le bilan est :

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 \quad (1-25)$$

Au niveau du détendeur, il n'y a ni échange de chaleur, ni travail fourni.

2.4.4 Évaporateur

Le bilan de l'évaporateur est :

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{Q}_F = \dot{m}_1 h_1 \quad (1-26)$$

On divise par le débit massique, on obtient

$$h_4 + Q_F = h_1 \quad (1-27)$$

Ce qui donne :

$$Q_F = h_1 - h_4 \quad (1-28)$$

La chaleur Q_F est absorbée par le fluide frigorigène, c'est la quantité de chaleur utile de l'installation frigorifique, elle permet le refroidissement du lieu où se trouve l'évaporateur.

En sommant l'ensemble des équations (1-19), (1-24) et (1-29) on obtient pour un cycle la relation suivante :

$$W + Q_C + Q_F = 0 \quad (1-29)$$

2.5 Performance

Une machine frigorifique est considérée comme performante lorsqu'elle fournit le maximum de production frigorifique pour un travail minimum, c'est la définition du coefficient de performance lui-même, on alors :

$$COP = \frac{Q_F}{W} \quad (1-30)$$

En remplaçant par les variations d'enthalpies correspondantes on a :

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (1-31)$$

De même pour une pompe à chaleur la performance est comptabilisée en comparant la chaleur cédée par le condenseur au travail fourni par le compresseur, ce qui donne :

$$COP = \frac{Q_C}{W} \quad (1-30)$$

En remplaçant par les variations d'enthalpies correspondantes on a :

$$COP = \frac{-(h_3 - h_2)}{h_2 - h_1} \quad (1-31)$$

2.6 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 process 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 de fabrication, de stockage et de distribution.

2.7 Amélioration du cycle de base

Partant d'une installation frigorifique composé des quatre éléments, son coefficient de performance peut être amélioré, en ajoutant certains accessoires ou en modifiant le parcours du fluide.

2.7.1 Ajout d'une bouteille accumulatrice

En ajoutant une bouteille à l'entrée du détendeur, voir la figure 10, le liquide s'accumulera et le détendeur sera alimenté de la partie basse, ceci permettra d'avoir avec assurance du liquide qui alimentera le détendeur, la chute de pression se fera directement de la courbe de saturation, sans cette bouteille il est possible d'avoir à l'entrée du détendeur un mélange de liquide et de vapeur.

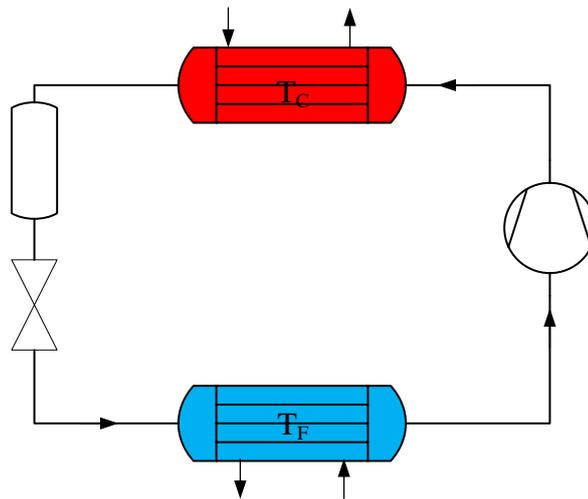


Figure 10 – Installation d'une bouteille d'accumulation

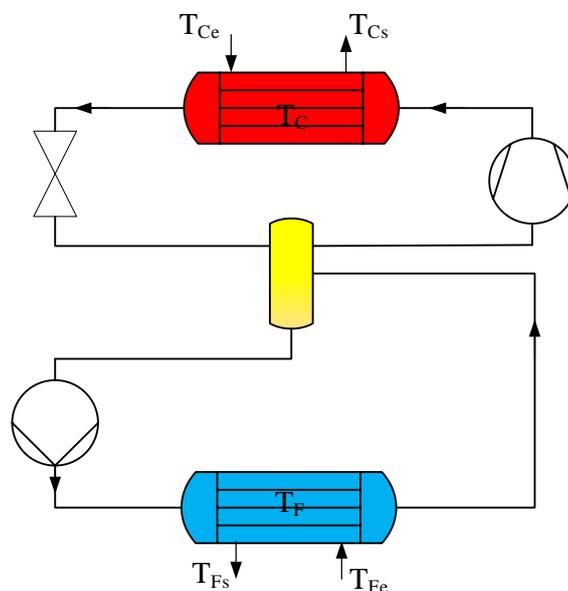


Figure 11 – Installation d'une bouteille intermédiaire

2.7.2 Installation d'une bouteille intermédiaire

L'installation d'une bouteille intermédiaire, indiqué sur la figure 11, va améliorer l'alimentation de l'évaporateur et du compresseur, l'évaporateur sera alimenté par de fluide frigorigène sous l'état liquide saturé, et le compresseur sera alimenté par la partie supérieure en fluide frigorigène à l'état vapeur saturé, ce procédé n'influe pas sur les puissances mais améliore le fonctionnement.

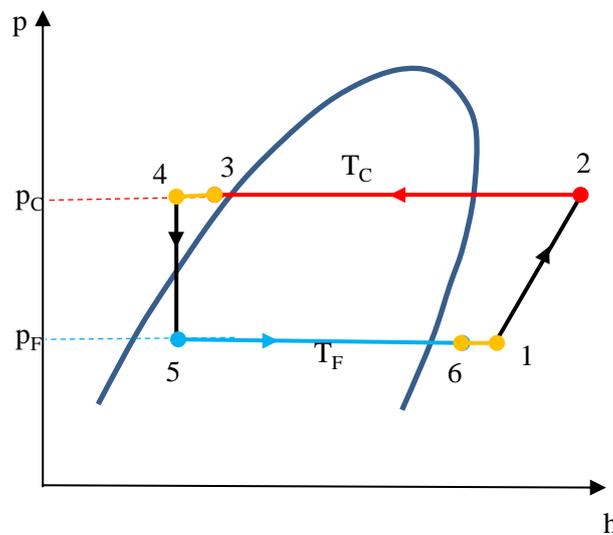
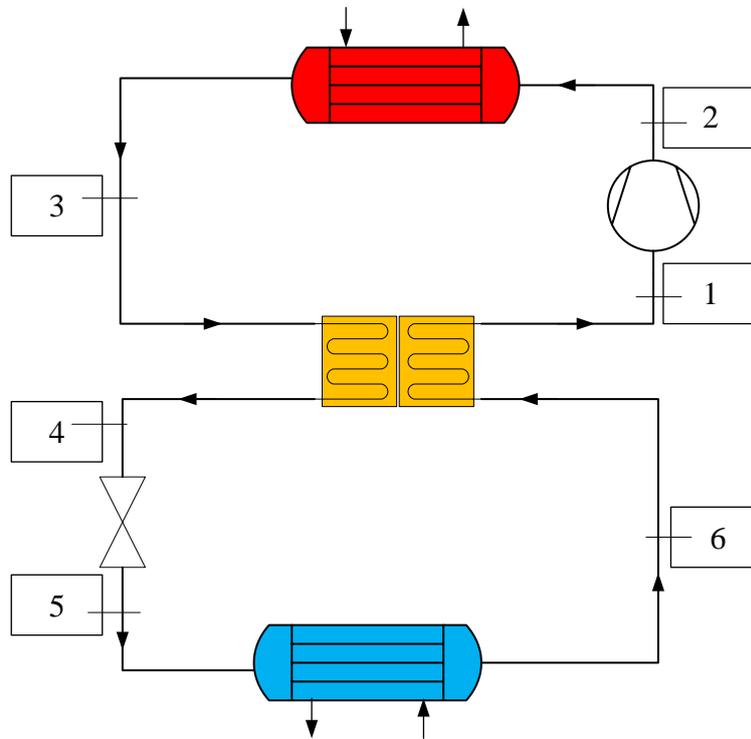


Figure 12 – Installation d'un échangeur intermédiaire

2.7.3 Installation d'un échangeur intermédiaire

L'échangeur intermédiaire permettra de coupler le sous-refroidissement du liquide à la surchauffe de la vapeur saturée, voir la figure 12, la variation d'enthalpie aux bornes de l'évaporateur se trouve augmentée et donc la puissance frigorifique pour le même travail fourni par le compresseur, il est possible avec ce procédé d'utiliser des températures encore plus basses.

2.7.4 Installation d'un échangeur entre deux compresseurs

C'est un type d'installation de compression bi-étagée montré dans la figure 13, où on modifie seulement la compression les autres éléments restants intacts, par ce procédé on réduit la puissance de compression, on améliore ainsi le coefficient de performance.

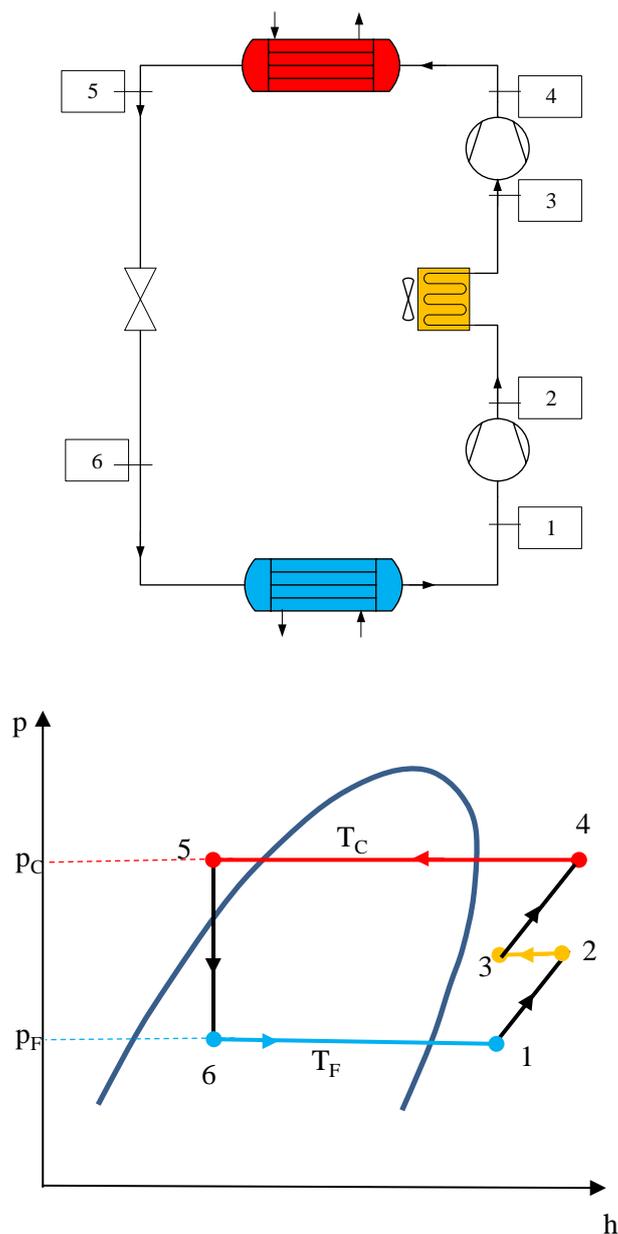


Figure 13 – Installation d'un échangeur entre les deux compresseurs

2.7.5 Installation bi-étagée à injection totale

Deux cycles interdépendants sont utilisés avec trois niveaux de pression et une bouteille intermédiaire, schématisé dans la figure 14, le premier circuit de la haute est composé d'un compresseur d'un condenseur et d'un détendeur, le second celui de la basse pression est composé d'un compresseur d'un évaporateur et d'un détendeur ; des améliorations importantes peuvent être réalisés, en diminuant la puissance de compression, en augmentant la puissance frigorifique de l'évaporateur, d'où une augmentation du coefficient de performance.

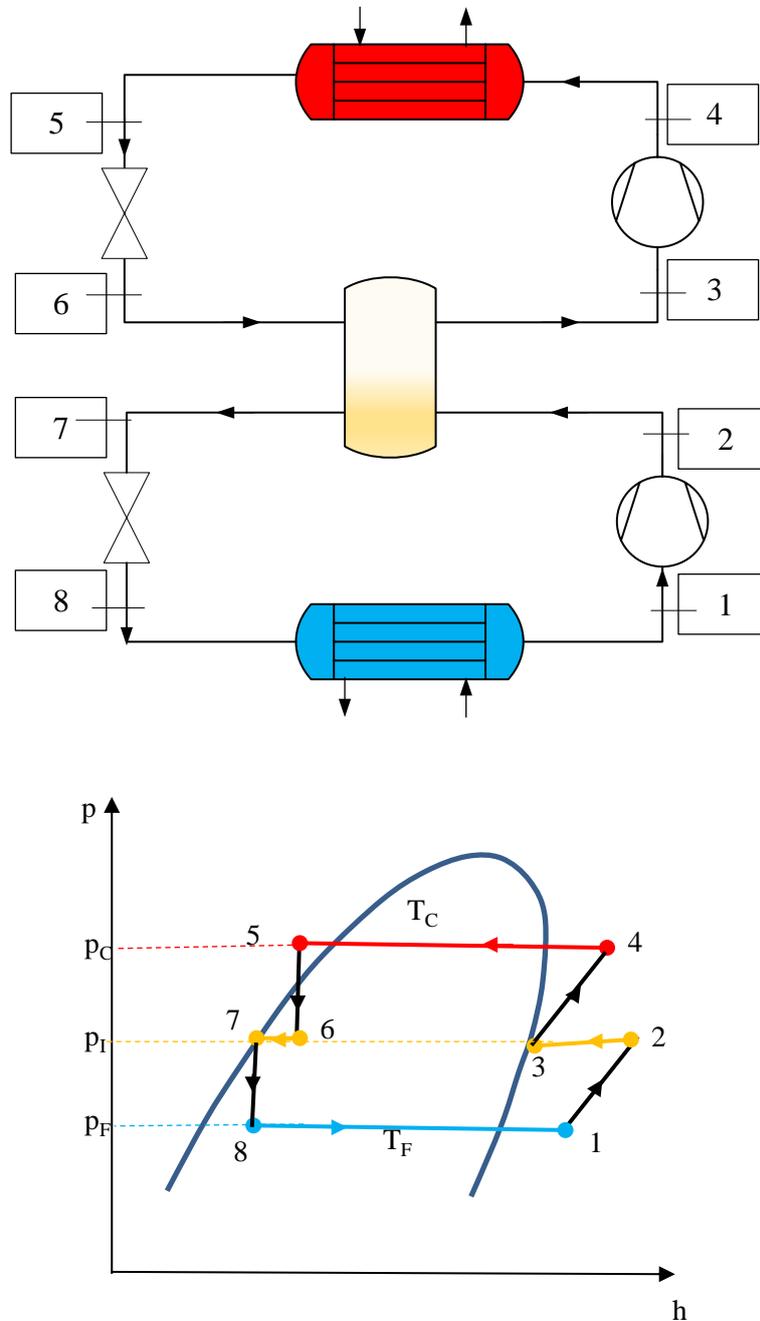


Figure 14 – Installation bi-étagée à injection totale

2.7.6 Installation en cascade

Des machines frigorifiques peuvent être montées en cascade ou l'évaporateur d'un circuit est couplé au condenseur du deuxième indiqué sur la figure 15, les circuits sont séparés et des fluides frigorigènes appropriés peuvent être utilisés, on obtient ainsi de très basses températures.

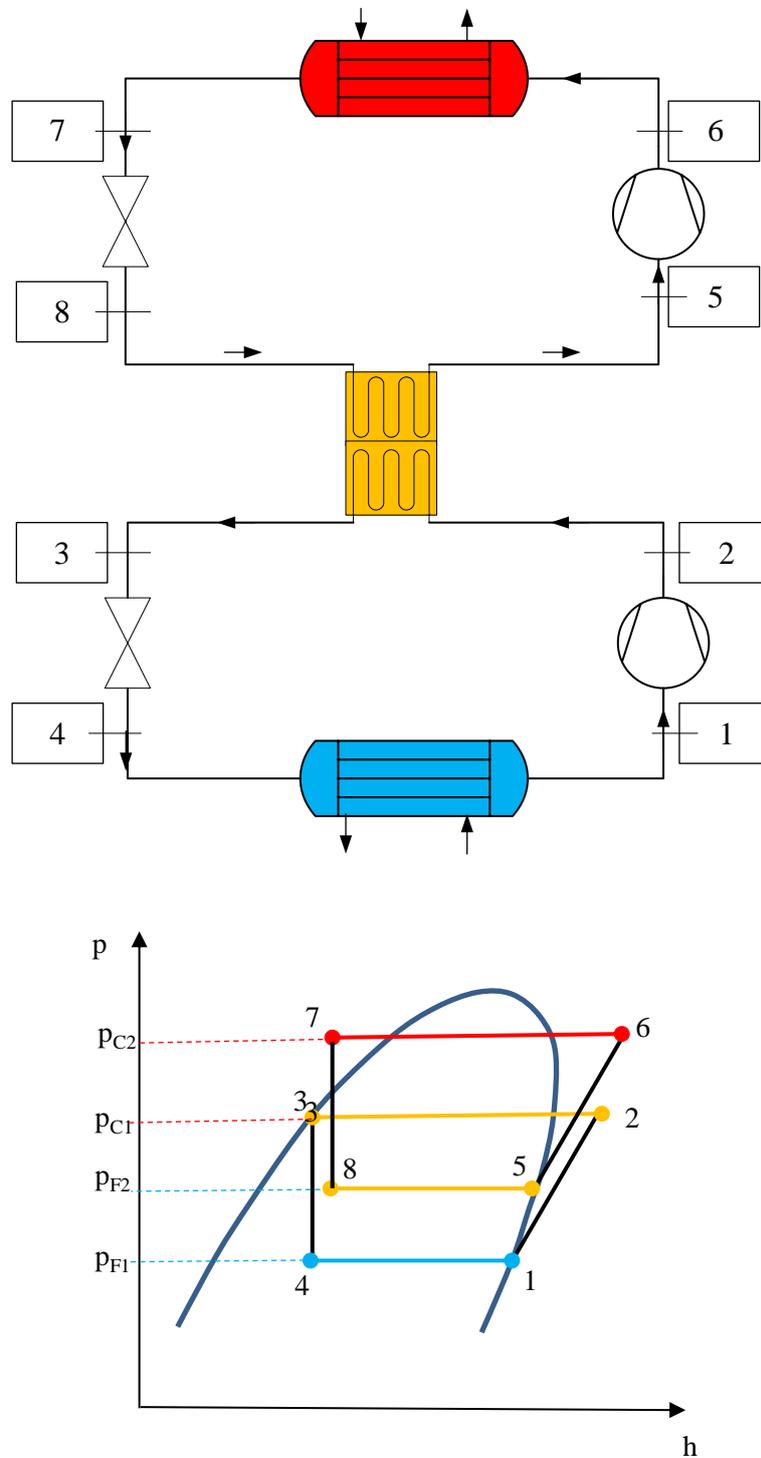


Figure 15 – Installation en cascade

2.8 Notion de fluide frigorigène

Un fluide frigorigène est un composé pur ou un mélange de composé utilisé dans un cycle frigorifique, il a la particularité d'être facilement liquéfiable et que sa température d'ébullition à la pression atmosphérique est faible.

2.8.1 Codification

Les fluides frigorigènes pour formule chimique générale $C_xH_yF_zCl_k$, on les codifie par $Rabc$ et on les appelle :

CFC : chlorofluorocarbures, absence d'hydrogène

HCFC : hydro-chlorofluorocarbures, présence

HFC : hydrofluorocarbures, absence de chlore

Le symbole du fluide frigorigène est de la forme $Rabc = R(x - 1)(y + 1)(z)$ avec la relation entre les indices : $y + z + k = 2x + 2$

La codification $Rabc$ permet de retrouver la formule chimique du composé :

- Le $R170$, ce qui donne $1 = (x - 1)$, $7 = (y + 1)$, $0 = z$; la résolution de ces équations donne $x = 2$ et $y = 6$, d'où la formule chimique C_2H_6 , qui est la formule chimique de l'éthane
- Lorsque le symbole ne comporte que deux chiffre, on considère la première lettre $a = 0$, ce qui donne pour le $R12$, $0 = (x - 1)$, $2 = (y + 1)$, $2 = z$ et $k = 2$, la formule chimique est CF_2Cl_2 , appelé le dichlorodifluorométhane.
- Le $R50$, ce qui donne $0 = (x - 1)$, $5 = (y + 1)$, $0 = z$; et $k = 0$, la formule chimique est CH_4 , appelé l'éthane.

Lorsque la même formulation chimique présente plusieurs isomères, on les identifie par des indices de lettres en minuscules ajoutés à la fin du symbole comme le $R134a$.

D'autres séries de fluides frigorigènes existent et sont identifiés par le premier chiffre :

La série $R400$; les fluides de cette série sont des mélanges zéotropiques, présentent un glissement de température ; pour une température donné la phase vapeur à la même composition que la phase liquide, exemples de mélange : $R407$, qui est composé de 20% de $R32$, 40% de $R125$, et 40% de $R134a$.

La série $R500$; les fluides de cette série sont des mélanges azéotropiques, ils ne présentent pas un glissement de température, il se présentent comme un corps pur, exemples de mélange : $R507$, qui est composé de 50% de $R125$, et 50% de $R134a$.

La série $R600$; les fluides de cette série sont des composés organiques et d'hydrocarbures, exemple de codification : le $R600$ est le butane, le $R600a$ est l'isobutane.

La série 700 ; les fluides de cette série sont des composés inorganiques, le premier chiffre correspond à la série, les deux chiffres suivants représentent la masse moléculaire du composé, exemple de codification : le R717 est l'ammoniac, le R744 est le dioxyde de carbone, et le R718 est l'eau.

La codification de toutes ces séries peut être retrouvée dans la norme américaine ANSI/ASHRAE 34 publiée en 2001, "Designation and Safety Classification of Refrigerants".

2.8.2 Classification de sécurité

Une classification des fluides frigorigènes a été faite avec un caractère alphanumérique (une lettre + un chiffre), regroupant le caractère de toxicité et d'inflammabilité du produit.

La toxicité est classée en deux niveaux, le caractère A correspond à l'absence de toxicité, le B présence de toxicité pour une certaine concentration.

L'inflammabilité est classée en trois niveau, 1 ne permet pas de propagation de la flamme, 2 inflammabilité limité et 3 hautement inflammable.

Exemple de classification : R718 l'eau A1, R290 propane A3, R717 l'ammoniac B2

2.9 Exercices

Exercice 1

En utilisant l'abaque ou le diagramme du fluide frigorigène du composé R134a

Déterminer la température de l'ébullition et l'enthalpie de vaporisation à la pression atmosphérique. Déterminer l'état du fluide et le titre en vapeur pour les conditions d'utilisation suivantes :

- $T = 0\text{ °C}, P = 1\text{ bar}$
- $T = 0\text{ °C}, P = 5\text{ bar}$
- $T = 0\text{ °C}, P = 3\text{ bar}, h = 250\text{ kJ/kg}$

Correction

La température d'ébullition est tirée de l'abaque, elle correspond à la pression de 1bar et vaut 27°C, la variation d'enthalpie pour la pression de 1bar entre les courbes de saturation de la vapeur et du liquide.

$$\Delta h = h(\text{vap saturée}) - h(\text{liquide saturé}) = 383 - 167 = 216\text{kJ/kg}$$

- $T = 0\text{ °C}, P = 1\text{ bar}$, vapeur
- $T = 0\text{ °C}, P = 5\text{ bar}$, liquide
- $T = 0\text{ °C}, P = 3\text{ bar}, h = 250\text{ kJ/kg}$, les deux premiers paramètres ne suffisent pas il faut ajouter un autre, mélange $x=26\%$