

Cours Froid

I. Introduction

La climatisation, également appelée « Le conditionnement d'air », est une branche scientifique consistant à générer et contrôler une atmosphère intérieure agréable (température, humidité, niveau de poussière, etc.) d'un local pour des raisons d'augmentation aussi bien que pour des raisons techniques

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 car il permet de limiter les gaspillages (pertes après récolte...) et de prolonger la durée de conservation des produits ce qui permet un élargissement des échanges.

Les systèmes de conditionnement d'air peuvent être classés en deux catégories : le système central et le système unitaire. Une station de système central est une structure dans laquelle les composants du système sont tous regroupés ensemble dans une chambre centrale. Mécanisée, celle-ci envoie, à travers des conduites, l'air conditionné aux espaces à climatiser.

Les systèmes unitaires, par contre, font usage d'unités en monobloc qui s'installent facilement et rapidement sur un mur, une fenêtre ou au-dessus d'une porte.

Le conditionnement de l'air est la technique qui consiste à modifier, contrôler et réguler les conditions climatiques (températures, humidités, niveau de poussières, etc.) d'un local pour des raisons de confort (bureaux, magasins, salles des stockages) ou pour des raisons techniques (ateliers de fabrications et de productions).

II. Conditionnement de l'air

Le conditionnement de l'air d'un local consiste à préparer et introduire de façon continue dans le local une certaine quantité d'air dont les caractéristiques sont telles que les conditions d'ambiance du local sont réalisées, vu que le conditionnement d'air du local diffère suivant l'utilisation du local, habitation, confort, industrie, locaux spécifiques (studio d'enregistrement, auditorium, théâtre...). Ces conditions portent sur :

- la température de l'air
- son humidité.
- son renouvellement
- sa pureté

II.1 L'objectif du conditionnement de l'air

L'objectif est de réaliser un microclimat intérieur confortable quelles que soient les conditions météorologiques extérieures et les apports de chaleur internes au local. Ces conditions météorologiques et ces apports internes définissent les charges que doit équilibrer le système de climatisation. Suivant la période pour laquelle est conçu ce système, on parle de climatisation d'hiver, d'été ou annuelle.

III. Le confort:

C'est un état de bien-être résultant de l'absence de nuisances de toutes sortes dans des ambiances et Microclimats intérieurs. Ce confort est l'un des principaux objectifs de la climatisation ou de traitement d'air. On distingue deux types de confort.

- Le confort thermique : se définit comme « état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique » Il dépend de six paramètres le métabolisme, l'habillement, la température ambiante de l'air « T_a », la température moyenne des parois « T_p », l'humidité relative de l'air « Ψ » et enfin la vitesse de l'air.
- Le confort acoustique : exige un niveau optimal de bruit, lequel est réduit en milieu industriel par le traitement des machines afin d'assurer une isolation contre les nuisances sonores. Plus précisément, on peut définir une plage de confort hygrothermique dans le diagramme suivant l'action de l'humidité spécifique de l'air sur la santé comme suit :

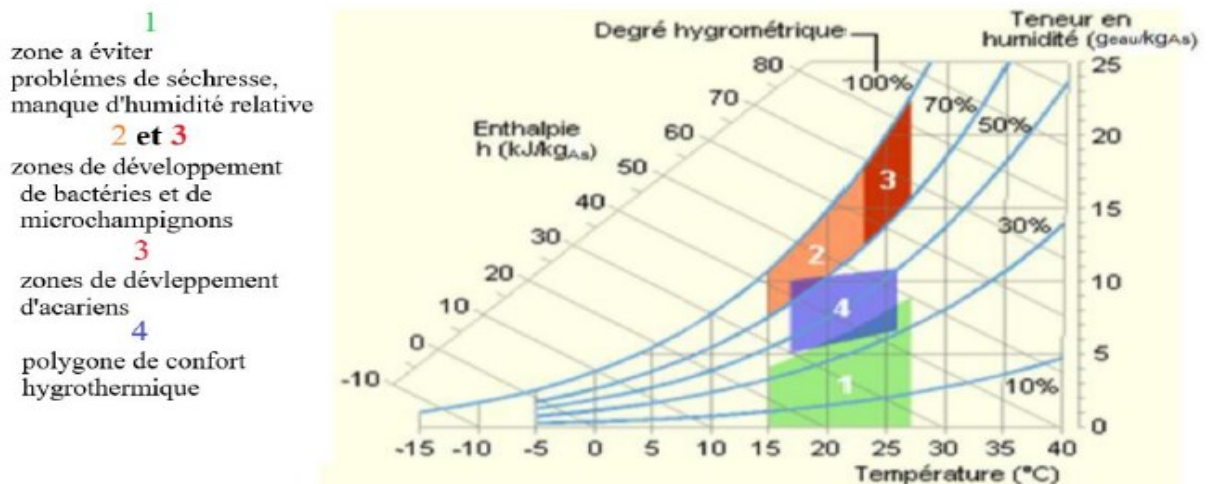


Figure.1 : La plage de confort température-humidité

IV. Humidification

L'humidification est réalisée avec l'utilisation des humidificateurs. Plusieurs types sont décrits dans la littérature, mentionnons les deux grandes familles que sont les adiabatiques et les isothermes. L'humidification adiabatique consiste à évaporer l'eau à température ambiante,

l'énergie de vaporisation de cette eau étant puisée dans l'air. Les humidificateurs adiabatiques causent alors une baisse de la température de l'air lors du processus d'humidification. Les humidificateurs isothermes injectent de la vapeur saturée dans l'air afin d'augmenter sa teneur en eau. La variation d'enthalpie est faible lors du processus d'humidification et c'est pourquoi ce processus est qualifié d'isotherme.

V. Cycles des machines frigorifiques

Définition Une machine frigorifique est un appareil destiné à créer du froid. Pour cela, il doit enlever (en un cycle) une quantité de chaleur Q_f à la source froide (exemple : air intérieur du réfrigérateur) et donner une quantité de chaleur Q_c à la source chaude (exemple : air ambiant de la cuisine), tout en recevant un travail W , du milieu extérieur, (Figure.2).

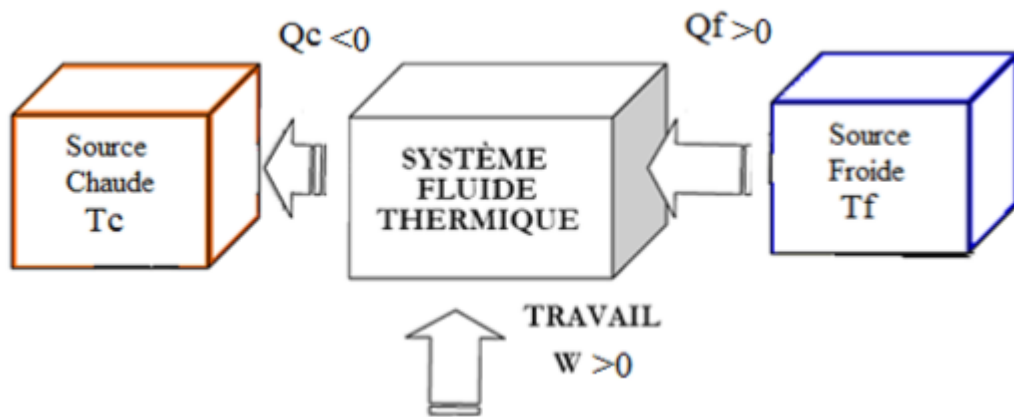


Figure 2. Schéma de fonctionnement d'une machine frigorifique

V.1 Efficacité thermique d'un cycle de machine frigorifique

L'efficacité thermique d'un cycle de machine frigorifique est le rapport entre l'énergie utile et l'énergie coûteuse qu'il a fallu fournir. Autrement dit, le rapport de ce qu'on veut (Q_f) sur ce qu'il faut dépenser pour l'avoir (W).

$$\varepsilon_{th} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}} = \frac{Q_f}{W_{cycle}} > \text{ou} < 1$$

V.2 Les Différents cycles frigorifiques

V.2.1 Le cycle frigorifique de référence

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

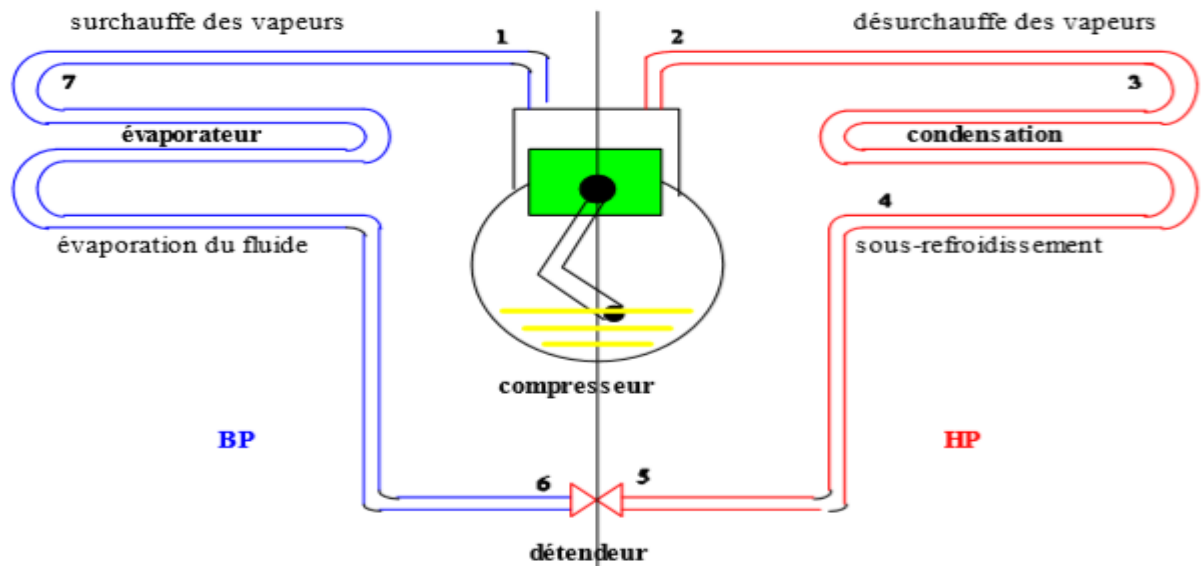


Figure 3- Schéma de la machine frigorifique de base.

Suivant le schéma de la machine frigorifique de la figure 3, le fluide frigorigène (FF) circulant dans le circuit frigorifique suit les évolutions suivantes :

- Entre 1 et 2 : compression des vapeurs de FF qui passent d'un niveau de basse Pression (BP) à un niveau de haute pression (HP)
- Entre 2 et 3 : désurchauffe des vapeurs de FF HP
- Entre 3 et 4 : condensation des vapeurs de FF HP qui deviennent du FF liquide HP
- Entre 4 et 5 : sous refroidissement du FF liquide HP
- Entre 5 et 6 : détente du FF liquide HP qui devient un mélange de liquide BP et d'une faible quantité de vapeurs BP
- Entre 6 et 7 : évaporation du FF liquide BP qui devient des vapeurs de FF BP
- Entre 7 et 1 : surchauffe des vapeurs de FF BP

La machine frigorifique à compression de vapeur est composée de 4 organes principaux que sont :

1. Evaporateur

Dans l'évaporateur le fluide se vaporise, la chaleur latente de vaporisation étant fournie par le médium de refroidissement qui se refroidi. Etat du fluide à l'entrée: mélange liquide vapeur (80% liquide- 20% vapeur), Etat du fluide à la sortie: vapeur basse pression surchauffée (régime sec).

2. Compresseur

Il absorbe les vapeurs issues de l'évaporateur, les compriment et les refoulent vers le condenseur. Etat du fluide à l'entrée: vapeurs BP surchauffées Etat du fluide à la sortie: vapeurs HP surchauffées

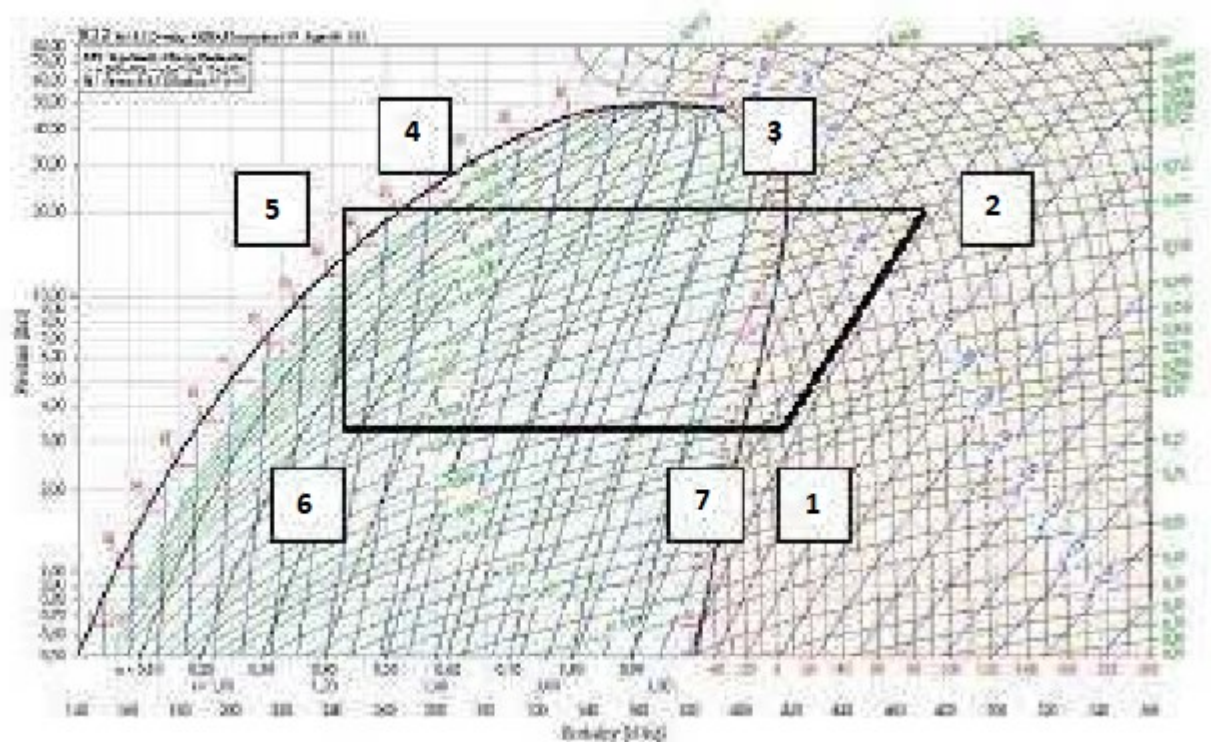


Figure 4. Cycle frigorifique de référence.

a) Les différentes étapes du cycle

1-2s	Compression isentropique du réfrigérant de l'état vapeur humide (1) à l'état vapeur saturée (2s) ($Q_{12s}=0$) : $W_{is}^c = W_{12s} = \Delta h_{12s} = h_{2s} - h_1 > 0$
2s-3	Condensation : le réfrigérant cède (à P et T constantes) la chaleur Q_c à la source chaude et passe de l'état de vapeur saturée (2s) à l'état de liquide saturée (3) : $Q_c = T_c(s_3 - s_{2s}) < 0$
3-4s	Détente isentropique du réfrigérant : $W_{is}^D = W_{34s} = \Delta h_{34s} = h_{4s} - h_3 < 0$
4s-1	Vaporisation : le réfrigérant enlève (à P et T constantes) la chaleur Q_f à la source froide (production de froid) et se vaporise partiellement de l'état (4) à l'état (1). Le titre de la vapeur $x_1 > x_4$: $Q_f = T_f(s_1 - s_{4s}) = T_f(s_{2s} - s_3) > 0$

b) Le bilan du cycle

Energie utile	Q_f
Energie coûteuse	$W_{cycle} = W_{is}^c + W_{is}^D = -(Q_f + Q_c)$
Efficacité thermique du cycle	$\varepsilon_{th} = \frac{Q_f}{W_{cycle}} = \frac{T_f}{T_c - T_f} > ou < 1$

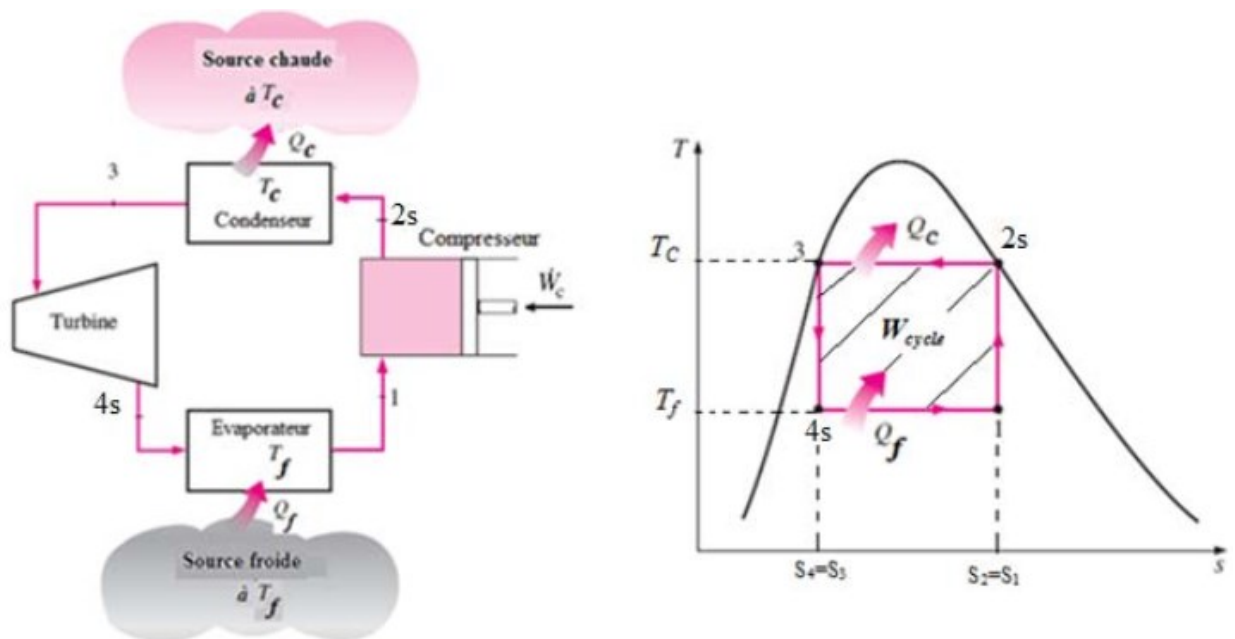


Figure 5. Cycle frigorifique de Carnot

V.2.3 Cycle idéal d'une machine frigorifique

Le cycle idéal (Fig. 6) diffère du cycle de Carnot par la présence d'une vanne de détente à la place de la turbine et par le fait que ce cycle n'évolue pas entièrement dans la zone de la vapeur humide

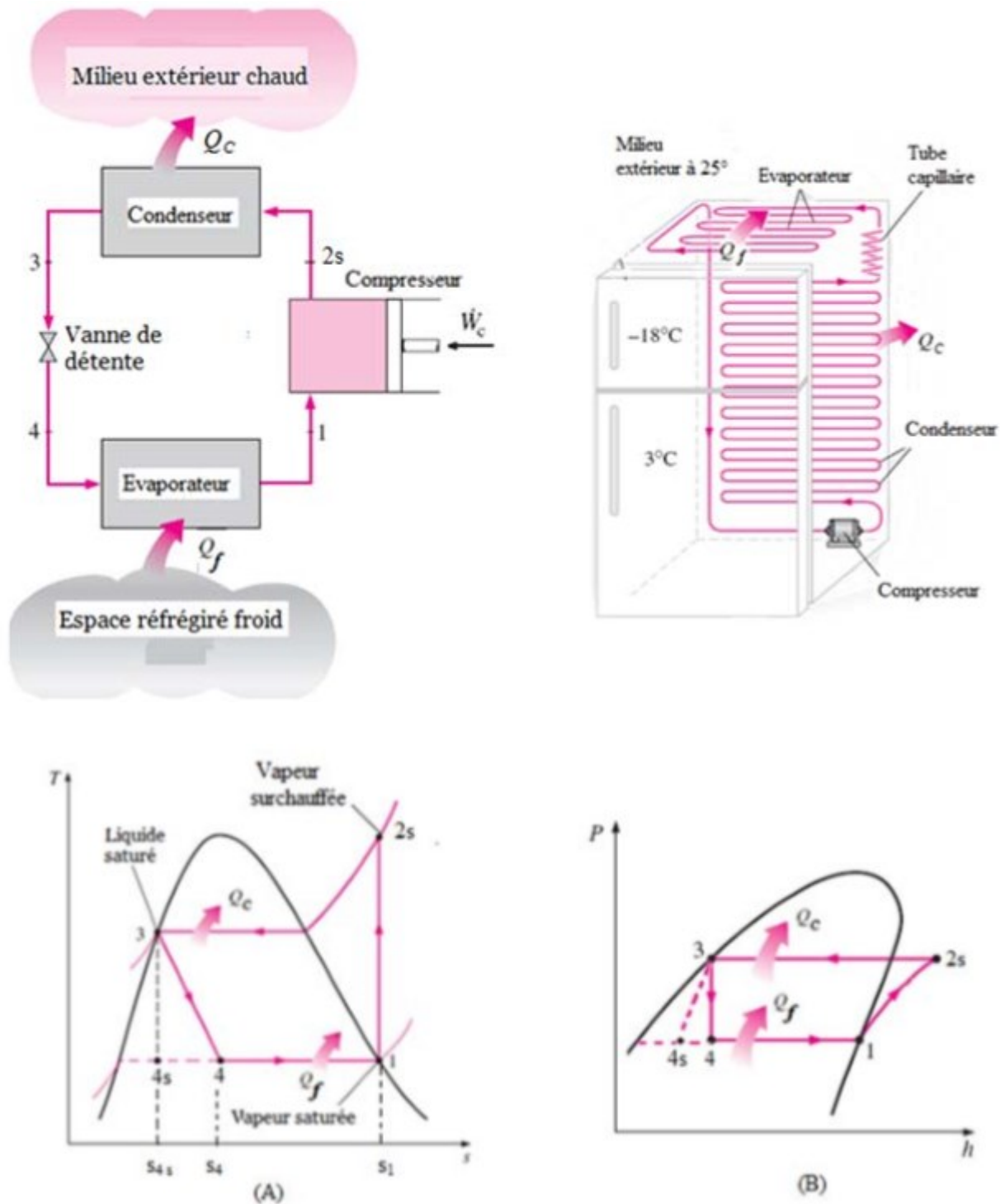


Figure 6. Cycle idéal d'une machine frigorifique représenté sur (A) diagramme ($T-s$) – (B) diagramme ($P-h$)

a) Les différentes étapes du cycle

1-2s	Compression isentropique du réfrigérant de l'état vapeur saturée (1) à l'état vapeur surchauffée (2s) ($Q_{12s}=0$) : $W_{is}^c = W_{12s} = \Delta h_{12s} = h_{2s} - h_1 > 0$
2s-3	Refroidissement isobare puis condensation : le réfrigérant cède la chaleur Q_C à la source chaude et passe de l'état vapeur surchauffée (2) à l'état liquide saturée (3) : $Q_C = \Delta h_{2s3} = h_3 - h_{2s} < 0$
3-4	Détente isenthalpique (de Joule Thomson) du réfrigérant à travers la vanne de détente ($Q_{34}=0$ et $W_{34}=0$) : $\Delta h_{34} = 0 \Rightarrow h_3 = h_4$
4-1	Vaporisation : le réfrigérant enlève (à P et T constantes) la chaleur Q_f à la source froide (production de froid) et se vaporise de l'état de vapeur humide (4) à l'état de vapeur saturée (1). $Q_f = \Delta h_{41} = h_1 - h_4 > 0$

b) Le bilan du cycle

Energie utile	Q_f
Energie coûteuse	$W_{cycle} = W_{is}^c$
Efficacité thermique du cycle	$\varepsilon_{th} = \frac{Q_f}{W_{cycle}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$

Remarque

➤ Toutes les transformations du cycle idéal sont réversibles sauf la transformation isenthalpique (3-4) qui est irréversible .

➤ Dans le cycle idéal d'une machine frigorifique (Figure.6), le fluide frigorifique subit une détente isenthalpique (3-4) et non pas isentropique (3-4s) comme dans le cas du cycle de Carnot. Cela entraîne une perte de l'effet frigorifique (surface (4s-4-S4-S4s-4s), Figure.6A ou segment (4-4s) Figure.6B). Pour éviter cette perte, on doit refroidir le fluide frigorifique à la sortie du condenseur de façon à récupérer la quantité de froid perdue. Cette question fera l'objet du prochain paragraphe.

V.2.4 Cycle actuel d'une machine frigorifique

Afin de récupérer la quantité de froid perdue à cause de la détente isenthalpique, on refroidit le liquide à la sortie du condenseur par la vapeur qui sort de l'évaporateur, à travers un échangeur de chaleur auxiliaire. De ce fait, le cycle actuel d'une machine frigorifique est donné par la figure 7.

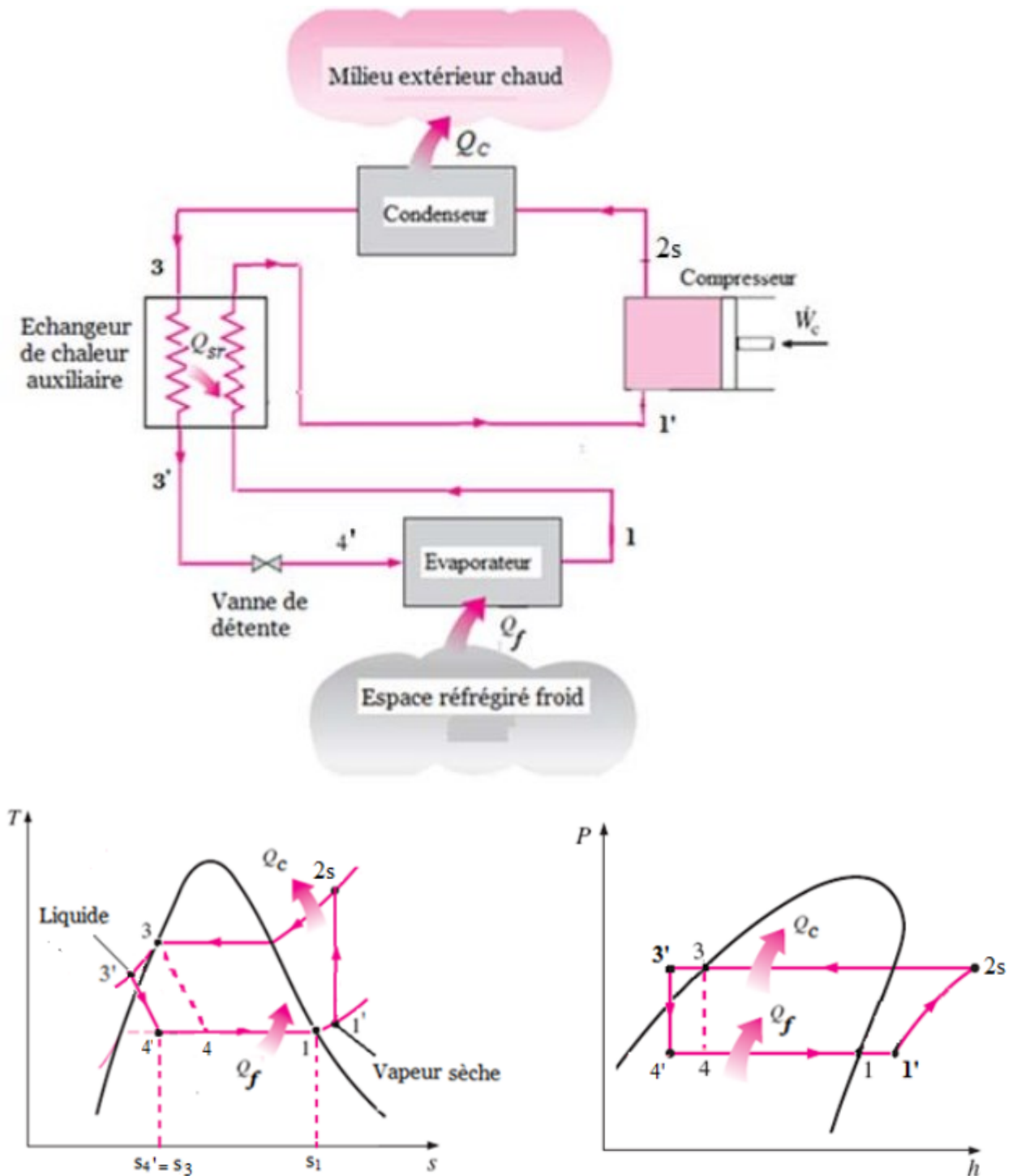


Figure 7. Cycle actuel d'une machine frigorifique

a) Différentes étapes du cycle

1'-2s	Compression isentropique du réfrigérant à l'état de vapeur surchauffée ($Q_{1'2s}=0$) : $W_{is}^c = W_{1'2s} = \Delta h_{1'2s} = h_{2s} - h_{1'} > 0$
2s-3	Refroidissement isobare puis condensation : le réfrigérant cède la chaleur Q_C à la source chaude et passe de l'état vapeur surchauffée (2s) à l'état liquide saturée (3) : $Q_C = \Delta h_{2s3} = h_3 - h_{2s} < 0$
3-3'	Refroidissement isobare du réfrigérant (liquide) dans l'échangeur de chaleur auxiliaire : $Q_{sr} = \Delta h_{33'} = h_{3'} - h_3 < 0$
3'-4'	Détente isenthalpique (de Joule Thomson) du réfrigérant à travers la vanne de détente ($Q_{3'4'} = 0$ et $W_{3'4'} = 0$) : $\Delta h_{3'4'} = 0 \Rightarrow h_{3'} = h_{4'}$
4'-1	Vaporisation : le réfrigérant enlève (à P et T constantes) la chaleur Q_f à la source froide (production de froid) et se vaporise de l'état de vapeur humide (4') à l'état de vapeur saturée (1). $Q_f = \Delta h_{4'1} = h_1 - h_{4'} > 0$
1-1'	Echauffement isobare du réfrigérant (vapeur surchauffée) dans l'échangeur auxiliaire : $Q_{sr} = \Delta h_{11'} = h_{1'} - h_1 > 0 (= h_3 - h_{3'})$

b) Le bilan du cycle

Energie utile	Q_f
Energie coûteuse	$W_{cycle} = W_{is}^c = -(Q_f + Q_C)$
Efficacité thermique du cycle	$\varepsilon_{th} = \frac{Q_f}{W_{cycle}} = \frac{h_1 - h_{4'}}{h_{4'} - h_1 + h_{2s} - h_3}$

V.2.5 Cycle cascade de réfrigération

Certaines applications industrielles nécessitent de basses températures qui ne peuvent être atteintes par un seul cycle de réfrigération. Pour cela on utilise plusieurs cycles de réfrigération qui opèrent en série. Un tel cycle est appelé cycle cascade de réfrigération. La figure 8 représente un cycle cascade de réfrigération à deux étages (I et II). L'échangeur de chaleur intermédiaire joue le rôle d'évaporateur pour le cycle I et le rôle de condenseur pour le cycle II.

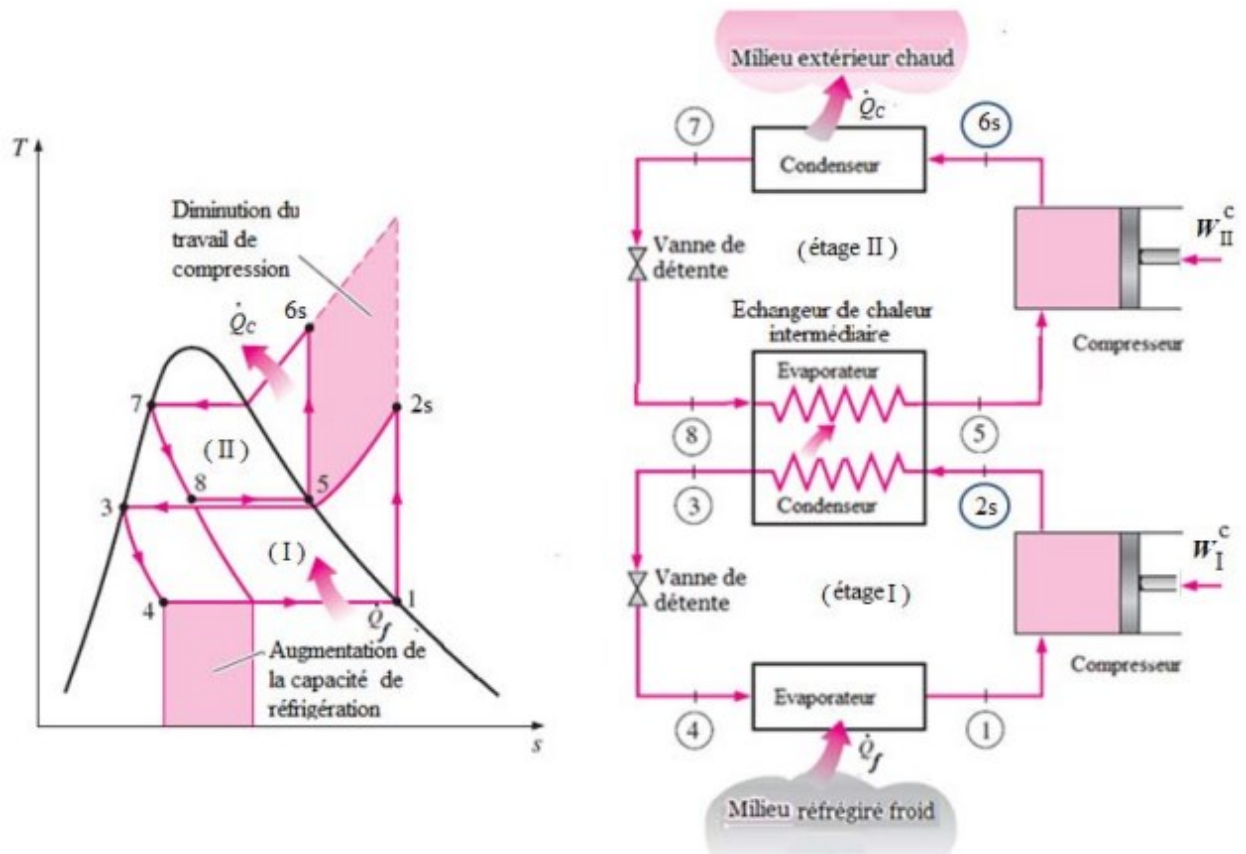
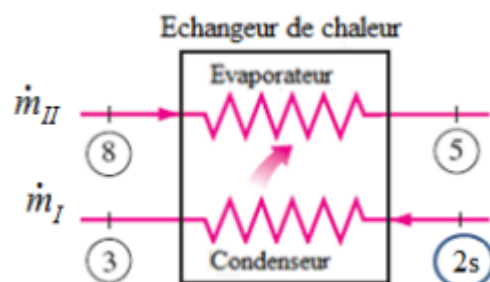


Figure.8 : Cycle cascade de réfrigération à deux étages

Remarque : Le débit du fluide frigorigène dans chaque étage du cycle n'est pas obligatoirement le même ($\dot{m}_I \neq \dot{m}_{II}, [kg/s]$). Si on suppose que le transfert thermique dans l'échangeur de chaleur du centre, est parfait, on peut écrire la relation suivante :

$$\dot{m}_I(h_5 - h_8) = -\dot{m}_{II}(h_3 - h_{2s})$$



V.2.6 Cycle de réfrigération à compression multi-étagé

Lorsque les fluides frigorigènes utilisés dans les différents étages de la cascade (Fig.8) sont de même nature, on remplace l'échangeur de chaleur intermédiaire (entre le cycle I et II) par une chambre de flash (voir Fig.9) qui permet de séparer les deux phases liquide-vapeur du réfrigérant à la sortie de la vanne de détente (6) : une quantité de liquide saturée ($1-x_6$) est envoyée vers la deuxième vanne de détente (7) et une quantité (x_6) de vapeur saturée est envoyée vers une chambre de mélange (3). Par la suite ces deux quantités (c'est-à-dire $(1-x_6)$ et x_6) vont se mélanger dans cette chambre.

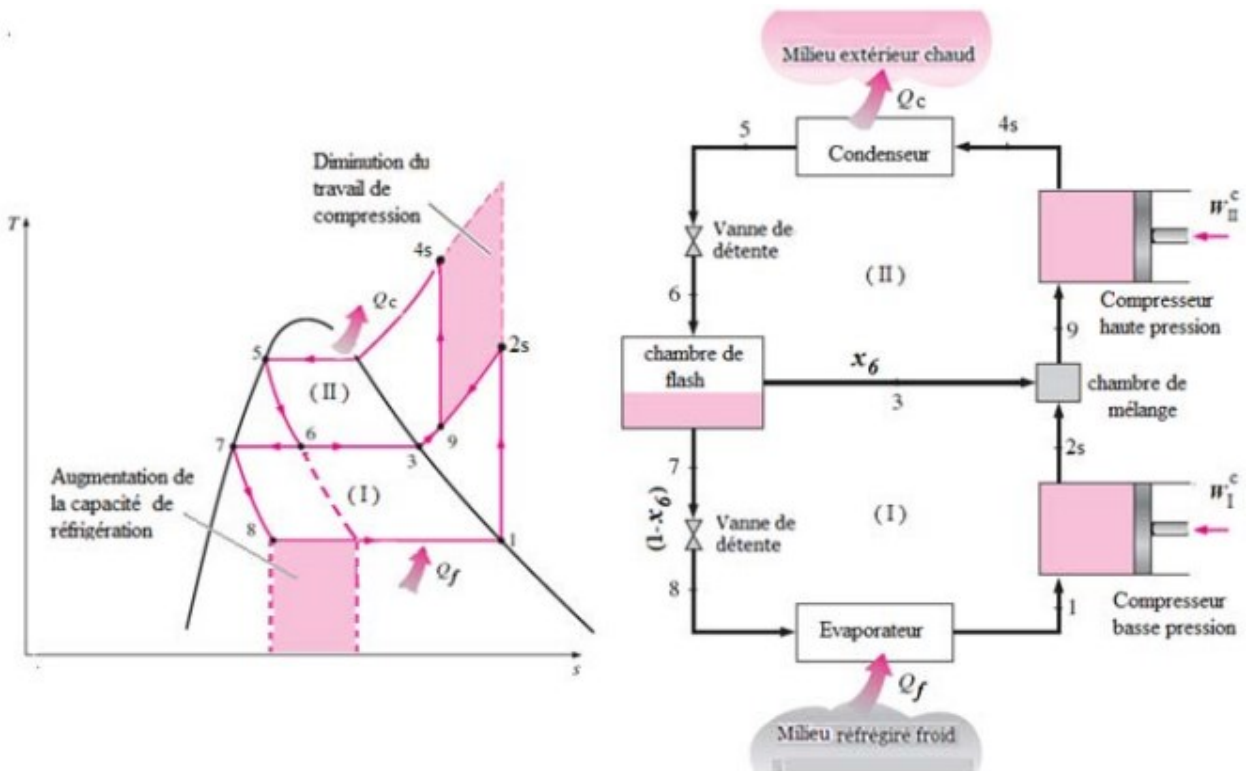


Figure.9 Cycle de réfrigération à compression multi étagé

VI. Les fluides frigorigènes

On appelle fluides frigorigènes les composés facilement liquéfiables. Ces fluides ont pour formule générique: $C_x H_y F_z Cl_k$

Le fluide frigorigène permet les échanges de chaleur dans un système frigorifique par ses changements d'état que sont l'évaporation et la condensation.

Il peut se définir comme une substance chimique dont la température d'évaporation à la pression atmosphérique est inférieure à la température ambiante, autrement dit le fluide frigorigène doit être liquide à cette ambiance.

VI.1 Critère de choix

A. Critères thermodynamiques

Ces critères concernent principalement le constructeur de machines.

- La pression d'évaporation est nécessairement supérieure à la pression normale pour éviter les entrées d'air et d'humidité. La température d'ébullition doit se situer à une température de froid désirée, souvent négative.
- La température de condensation doit être inférieure à la température critique pour que le changement d'état soit possible.
- Production frigorifique volumétrique spécifique: c'est la quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur rapporté à l'unité de volume de vapeur aspiré au niveau du compresseur: elle doit être aussi grande que possible. Cette valeur est liée à la L_V .
- La condensation sera d'autant plus aisée que la chaleur massique de la vapeur saturante est faible.

Le tableau 1. donne les températures d'évaporation (d'ébullition) de certains fluides frigorigènes à la pression atmosphérique.

Fluide (réfrigérant)	Température d'ébullition (°C)
Eau – H ₂ O – R718	100
R11	23.3
R12	-29.8
R22	-40.7
R502	-45.6
Ammoniac - NH ₃ – R717	-33.3

Tableau 1- Températures d'ébullition de quelques fluides à la pression atmosphérique.

B. Critères techniques des fluides frigorigènes

- Etre de faible activité chimique à l'égard des métaux, alliages et joints du circuit, ainsi que les lubrifiants qui leur sont mélangés et de l'eau (de 0,5 à 3% dans tous les fluides). La présence d'eau pourrait former des acides ou des bases qui sont corrosifs.
- Avoir une bonne conductibilité thermique

C. Critères de sécurité

- Bonne stabilité chimique, compte tenu de l'importance des écarts de température auxquels ils sont soumis à chaque cycle.
- Ininflammabilité et inexplosibilité en cas de mélange avec l'air

- Sécurité alimentaire: en cas de fuite, inactivité sur les denrées, non nocif pour le personnel, facilement détectable.
- Non destructeur de la couche d'Ozone stratosphérique.

D. Critères économiques

- Prix: regain d'intérêt pour l'ammoniac (NH_3) (pas de réaction avec ozone)
- Disponibilité: pour la recharge du circuit ou remplacement imposé par la législation.

❖ Exemple

A chaque fluide frigorigène correspond un diagramme enthalpique

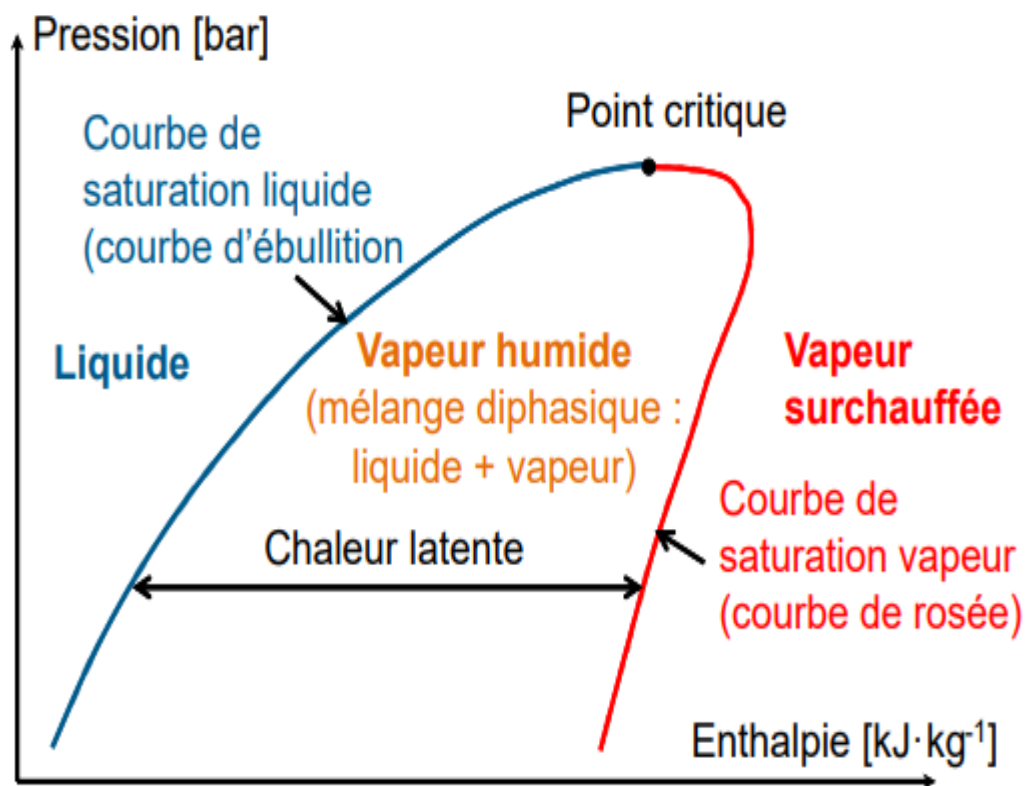


Figure10- Diagramme de Mollier

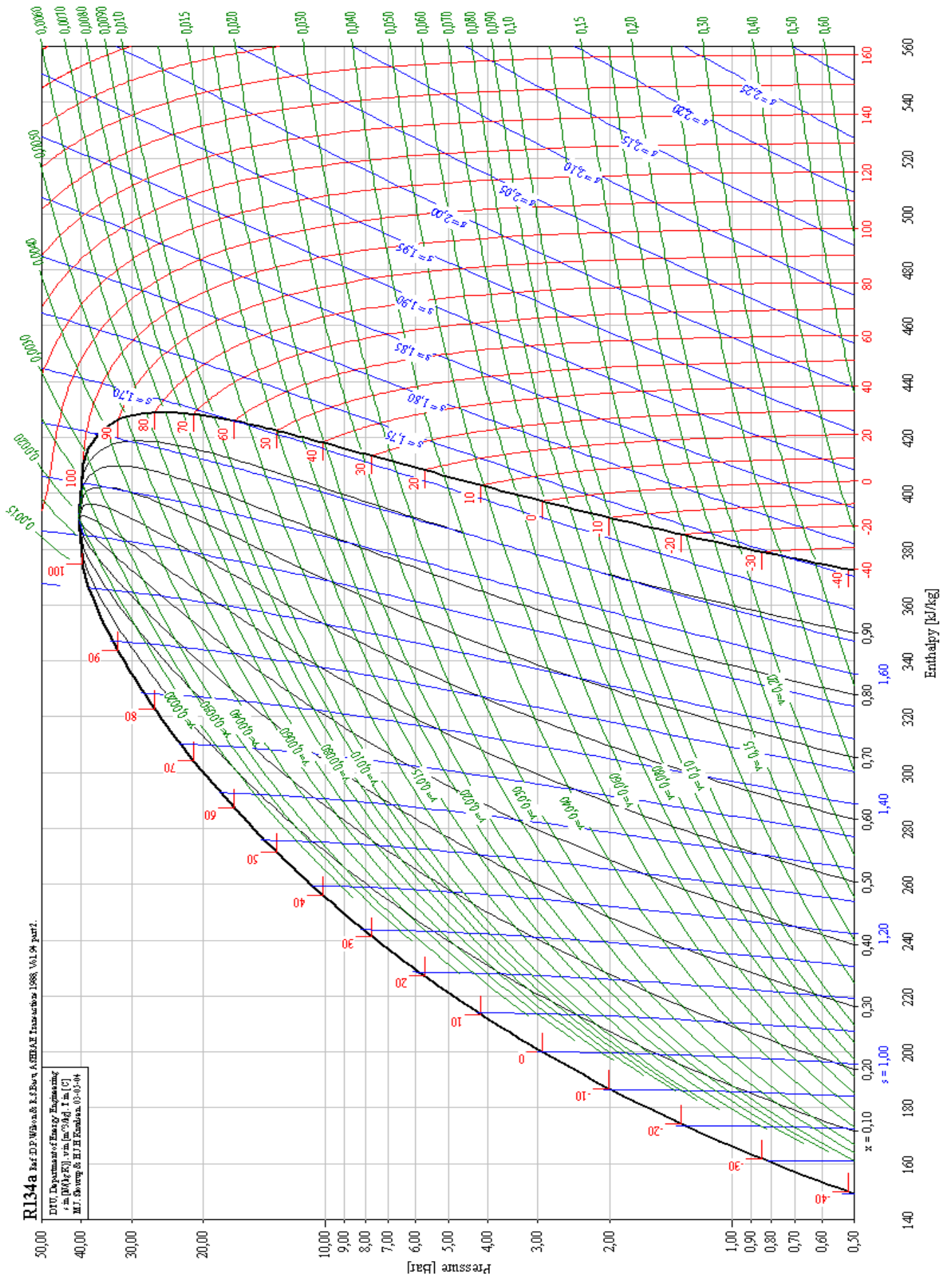


Figure 11- Diagramme de Mollier (enthalpie) du fluide R134a.

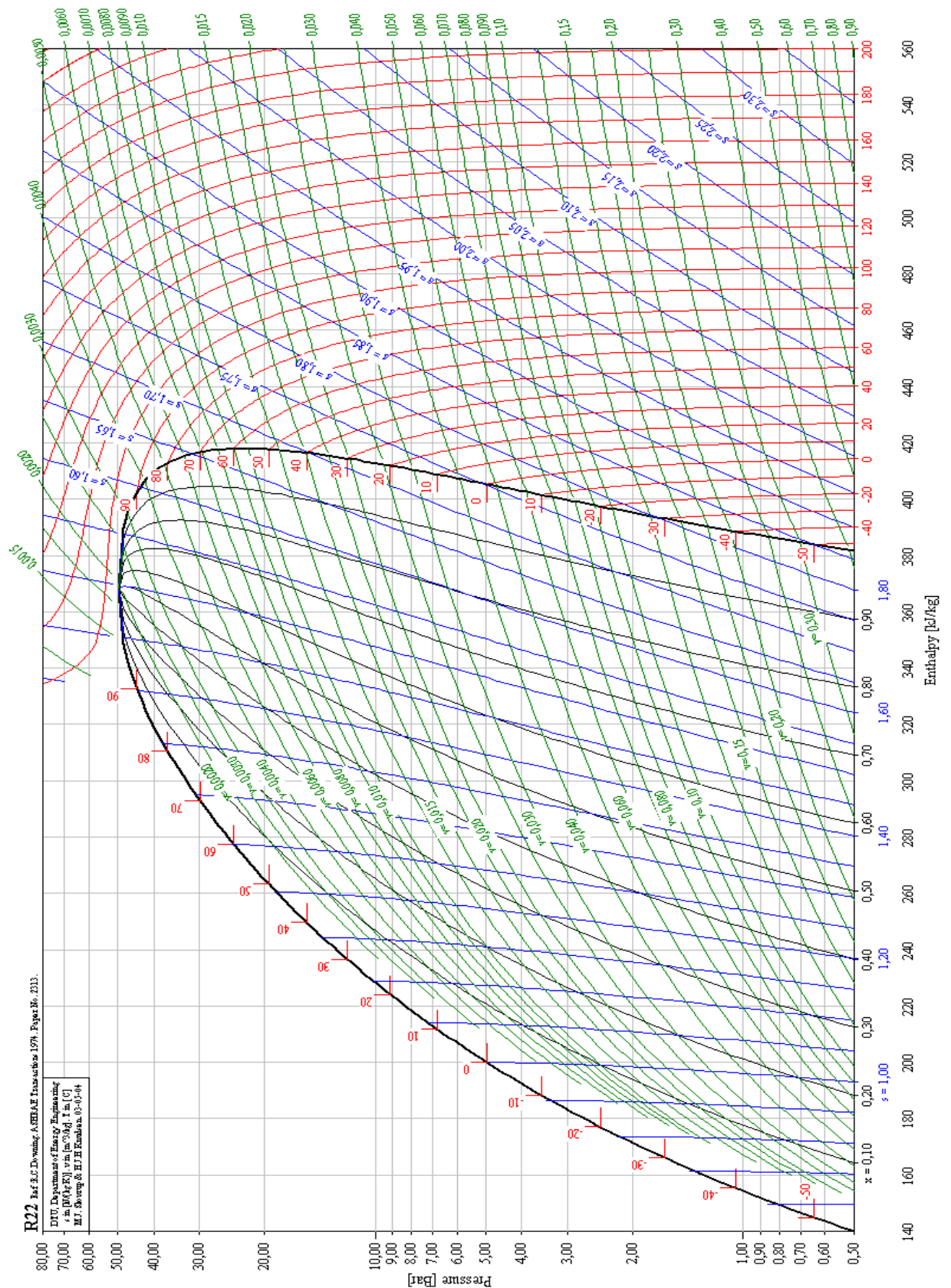


Figure 12- Diagramme de Mollier (enthalpique) du fluide R22.

Le tableau (2) donne un exemple de caractérisation d'un fluide frigorigène.

	Exemple du R22
Nom du fluide	R22
Famille	HCFC (hydrochlorofluoroacarbène)
Formule chimique	CHF_2Cl
Couleur	Incolore
Odeur	Très légèrement étherée
Température critique	96°C
Pression critique	49.8 bar
Température d'ébullition à la pression atmosphérique	-40.9°C
Solubilité de l'eau dans le produit	0.13% en masse
Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone	0.05
Potentiel d'effet de serre global à 100 ans	1 700
Informations toxicologiques	Non nocif par inhalation Décomposition thermique à haute température en produits toxiques et corrosifs Gelures possibles par projection du gaz liquéfié
Précautions individuelles	Eviter le contact avec la peau (gants), les yeux (lunettes) Ne pas fumer
Manipulation et stockage	Eviter le contact avec les flammes Tenir à l'écart de la chaleur Stocker dans un endroit frais et ventilé
Informations réglementaires	Substance classée non dangereuse Fluide non inflammable et non toxique Groupe de sécurité A1 (A : faiblement toxique – 1 : pas de propagation de flamme à 18°C et 101300 Pa)
Détection de fuites	Lampe haloïde Mousse à savon Détecteur électronique adapté
Précautions nécessaires au montage et à la mise en service	Propreté poussée lors du montage Utiliser des raccords brasés Effectuer les brassages sous atmosphère neutre Effectuer un tirage au vide poussé : inférieur à 30 Pa Utiliser un lubrifiant minéral ou de synthèse
Domaines d'applications	Conditionnement d'air résidentiel, commercial et industriel Refroidisseur de liquide Installations à température négative

Tableau 2 Caractérisation d'un fluide frigorigène R-22

VI.2 Classification

Les fluides frigorigènes obéissent à une classification qui permet une désignation précise de chaque fluide.

Cette classification est effectuée sur la base de critères différents suivant la famille ou la sous famille de fluides considérés.

Les fluides frigorigènes sont divisés en deux grandes familles que sont :

Les composés inorganiques et les composés organiques

VI.2.1 Les composés inorganiques

Les fluides de cette famille sont ceux de la série **700**.

Le fluide le plus utilisé de cette famille est l'ammoniac (NH_3) et il est désigné par **R717**

R désigne Réfrigérant

Le **7** des centaines désigne la série **700**

Le **17** représentant les deux derniers chiffres désigne la masse molaire du corps (14 pour l'azote « N » et 3 pour l'hydrogène « H »)

Autres exemples de composés inorganiques :

L'eau (H_2O) : R718

Le dioxyde de carbone (CO_2) : R744

VI.2.2 Les composés organiques

Les composés organiques sont des dérivés du méthane (CH_4) et de l'éthane (C_2H_6). Ils se divisent en trois sous familles :

Les corps purs, Les mélanges (de corps purs) et Les hydrocarbures

A. Les corps purs

Les corps purs se regroupent en trois sous groupes suivant leur composition chimique :

CFC (Chloro-fluoro-carbone)	HCFC (Hydro-Chloro-Fluoro-carbone)	HFC (Hydro-Fluoro-carbone)
Cl Chlore F Fluore C Carbone Exemple: R-11, R-12 ,R-113, R-114, R-115	H Hydrogène Cl Chlore F Fluore C Carbone Exemple : R-22, R-123	H Hydrogène F Fluore C Carbone Exemple : R134a, R-125, R-139

Tableau 3 Les corps purs

Les molécules des CFC sont complètement halogénées.

Ceux des HFC ne contiennent aucun atome de chlore.

Quant aux molécules des HCFC, ils contiennent du chlore non complètement halogéné; autrement dit certains atomes de chlore ont été remplacés par des atomes d'hydrogène.

Leur désignation est basée sur la règle suivante :

R : Réfrigérant

Chiffre des unités « u » : nombre d'atomes de fluor

Chiffre des dizaines « d » : nombre d'atomes d'hydrogène + 1

Chiffre des centaines « c » : nombre d'atomes de carbones – 1

La valence du carbone étant de 4, la molécule sera complétée par des atomes de chlore si nécessaire. Les lettres minuscules en fin de numérotation désigne une asymétrie plus (b) ou moins (a) de la molécule.

B. Les mélanges

Les mélanges de corps purs se regroupent en deux sous groupes que sont :

- les mélanges azéotropiques qui se comportent comme des corps purs
- les mélanges zéotropiques qui ne sont pas des corps purs

Les mélanges **azéotropiques** sont les fluides frigorigènes de la série **500**

Les deux derniers chiffres indiquent le numéro d'ordre d'apparition du fluide considéré.

Exemple : le R502 (mélange de 48.8% de R22 et de 51.2% de R115)

Les mélanges **zéotropiques** sont les fluides frigorigènes de la série **400**.

Les deux derniers chiffres indiquent le numéro d'ordre d'apparition du fluide considéré.

Exemple : le R404A (mélange de 52% de R143a, de 44% de R125 et de 4% de R134a)

Dans le cas de mélanges de corps purs identiques mais dans des proportions différentes (isotopes), on associe une lettre majuscule (A,B,C) en fin de numérotation dans l'ordre chronologique d'apparition.

Exemple : R407A, R407B, R407C

R407A (mélange de 20% de R32, de 40% de R125 et de 40% de R134a)

R407B (mélange de 10% de R32, de 70% de R125 et de 20% de R134a)

R407C (mélange de 23% de R32, de 25% de R125 et de 52% de R134a)

C. Les hydrocarbures

Les fluides frigorigènes du type hydrocarbure proviennent essentiellement du raffinage du pétrole mais également du dégazolinage (récupération des hydrocarbures liquides) du gaz naturel. Ce sont essentiellement le R600 (butane), le R600a (isobutane) et le R290 (propane) qui

est le plus utilisé. Contrairement aux autres fluides frigorigènes, les hydrocarbures sont **hautement inflammables**.

VI.3 Les autres fluides utilisés en froid

VI.3.1. Les huiles frigorifiques (Les huiles de graissage)

Dans les machines frigorifiques à compression de vapeur, l'huile assure les fonctions suivantes :

- Lubrification des organes mobiles du compresseur (rôle principal)
- Étanchéité entre les différentes pièces du compresseur
- Refroidissement du compresseur

Caractéristiques physico-chimiques des huiles frigorifiques

Une bonne huile frigorifique doit présenter les caractéristiques suivantes :

- être non oxydable ; la pénétration d'air dans le circuit frigorifique peut provoquer l'oxydation de l'huile, ce qui entraîne la formation de produits corrosifs ou occasionner avec des agents halogénés, la formation de boues dues aux produits de polymérisation
- avoir une acidité nulle
- présenter de faibles propriétés émulsives
- être sans actions sur le cuivre
- avoir un point de goutte (ou point de trouble pour les huiles paraffinées) très bas, dans tous les cas inférieur à la température d'évaporation
- avoir un point éclair (point d'inflammabilité) élevé

VI.3 Les fluides frigorigènes les plus répandus :

Le tableau (4) qui donne les fluides frigorigènes les plus répandus et leurs propriétés

Fluides frigorigènes	Formule chimique	Température d'ébullition °C	Observation
R717 ammoniac	NH ₃	-33,3	- Très courant dans les installations industrielles - Production frigorifique importante - Toxique - Attaque le cuivre et ses alliages - Stable jusqu'à 150 °C.
R12	CCl ₂ F ₂	-29,8	- Incolore à odeur presque nulle - Extrêmement courant - Utilisé dans toutes les installations (industrielles, commerciales et réfrigérateurs ménagers) - Pas d'action sur les métaux utilisés sur les systèmes frigorifiques - Stable jusqu'à 120 °C.

R22	CHClF ₂	-40,8	- Incolore à odeur légèrement étherée - Largement utilisé en conditionnement d'air - Neutre vis-à-vis des métaux usuels - Se décompose à 150 °C - très stable.
R502	R22+R115	-45,6	- Mélange azéotrope R22 (48,8%) et R115 (51,2%) - Incolore à odeur très légèrement étherée - Utilisé dans les vitrines réfrigérées, les congélateurs, les installations de surgélations des aliments - Se décompose à des températures voisines de 150°C
R13	CClF ₃	-81,4	- Incolore à odeur étherée - Utilisé pour l'obtention de basses températures (-80 °C à -100 °C) - Se décompose à 160 °C.
R13B1	CF ₃ Br	-57,8	- Même utilisation que R13 - Lyophilisation (température - 40 °C à -70 °C).
R114	C ₂ Cl ₂ F ₄	3,5	- Utilisé dans les installations de climatisation et pompe à chaleur industrielles.
R142b	C ₂ H ₃ ClF ₂	-9,25	- Utilisé dans les installations de pompes à chaleur industrielles (jusqu'à 100°C en température de condensation).
R404A	HFC	-45,8	- Incolore à odeur légèrement étherée - Très stable - Produits toxiques et corrosifs - Installations industrielles et commerciales à température négative - Surgélateur - Centrales frigorifiques.
R744	CO ₂	-78,5	- Incolore - Odeur inodore - Stable dans les conditions normales - Substance classé non toxique et non corrosive - Domaine d'application : machine frigorifiques.
R290 propane HC	C ₃ H ₈	-42,4	- Incolore, d'odeur douceâtre - Non décelable aux faibles concentrations - Domaines d'application : l'application principale est les pompes à chaleur

			- Température critique 96,7°C.
R407	R32+R125+R134a	-43,4	- Mélange zéotrope R32 (23%) et R125 (25%) et R134a (52%) - Incolore d'odeur légèrement éthérée - Très stable - Domaines d'application : l'application principale est le conditionnement de l'air de petites et moyennes puissance - Température critique 86,2 °C.

Tableau 4- Les fluides frigorigènes les plus répandus

VII. Le diagramme enthalpique

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

Il existe un diagramme enthalpique pour chaque fluide frigorigène.

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

VII.1 Présentation générale

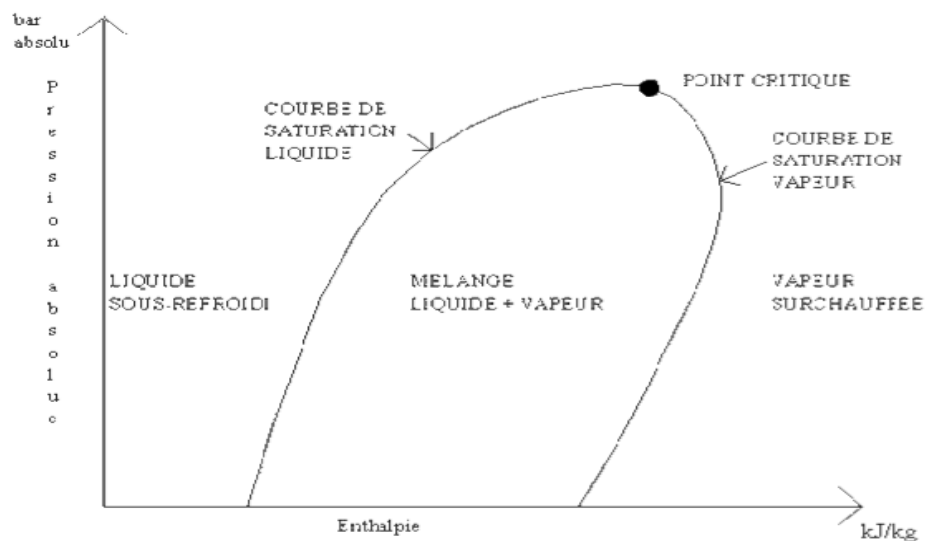


Figure 11- diagramme enthalpique

Le diagramme est délimité en abscisse par l'échelle des enthalpies et en ordonnée par l'échelle des pressions. Les courbes de saturation se rejoignent au point critique et divisent le diagramme en trois parties :

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

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

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

VII.2 Evolution des différents paramètres

➤ La pression

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

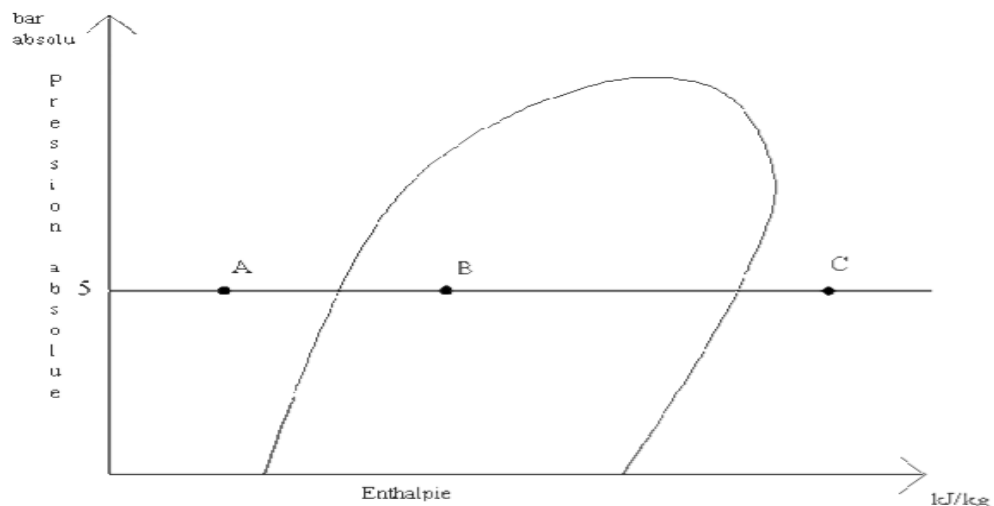


Figure 12- diagramme enthalpique (L'échelle des pressions)

- Pression en A = Pression en B = Pression en C = 5 bar absolus Symbole de la pression : P ;
Unité de la pression : bar

➤ L'enthalpie

L'échelle des enthalpies évolue parallèlement à l'axe des pressions. L'enthalpie représente l'énergie totale emmagasinée par 1 kg de fluide frigorigène pour une pression et une température donnée. Une transformation qui s'effectue à enthalpie constante est une transformation ISENTHALPE.

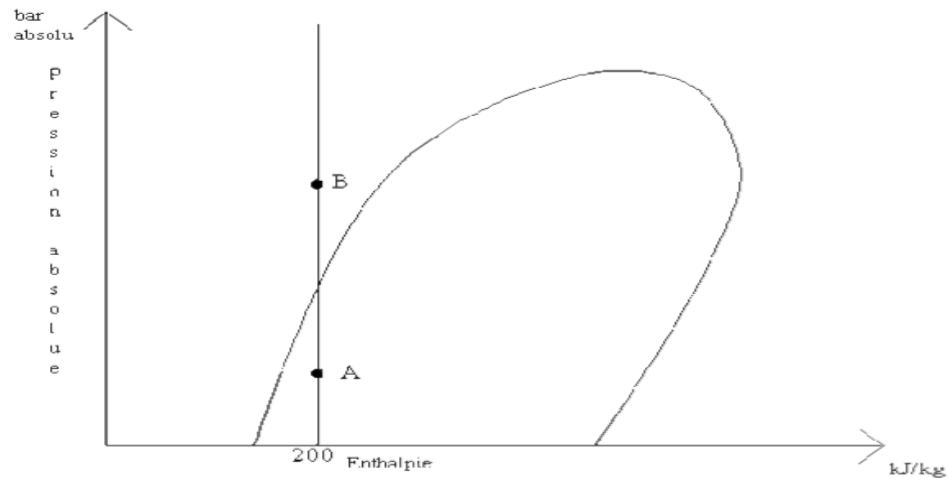


Figure 13- diagramme enthalpique (L'échelle des enthalpies)

- enthalpie en A = enthalpie en B = 200 kJ/kg Symbole de l'enthalpie : h ; Unité de l'enthalpie : kJ / kg

➤ **La température**

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

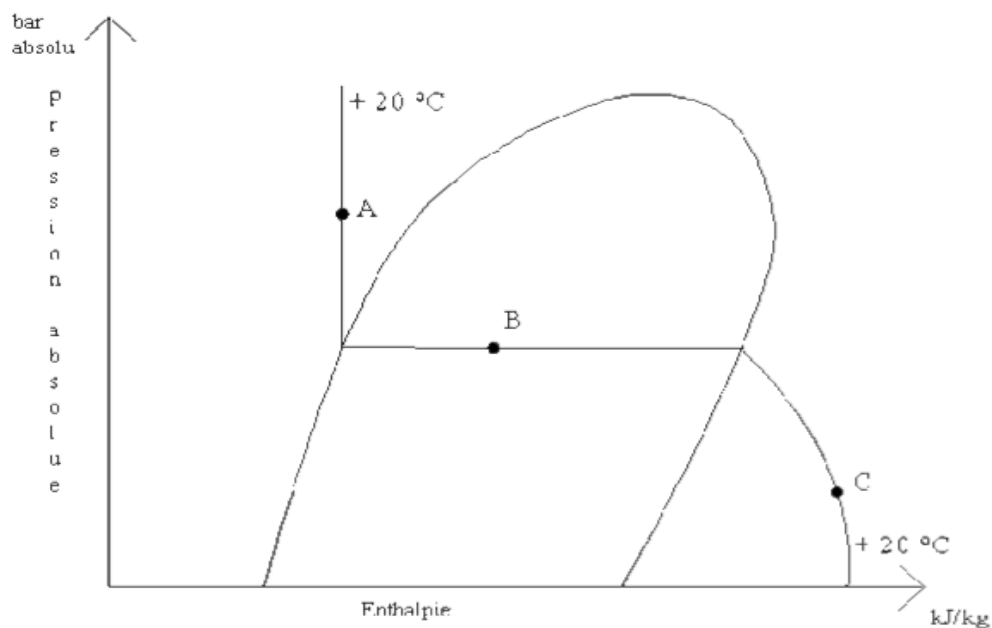


Figure 14- diagramme enthalpique (la température et la pression sont liées)

- Température en A = température en B = température en C = + 20 °C Symbole de la température : T ; Unité de température : °C

➤ **Le volume massique**

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

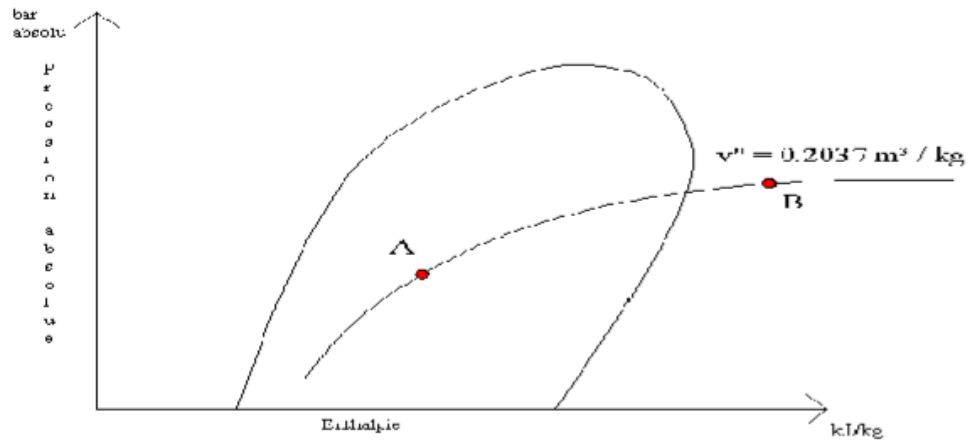


Figure 15- diagramme enthalpique (L'échelle des volumes massiques)

- Volume massique en A = volume massique en B = $0,2037 \text{ m}^3/\text{kg}$ Symbole du volume massique : v'' ; Unité du volume massique : m^3 / kg

➤ **L'entropie**

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

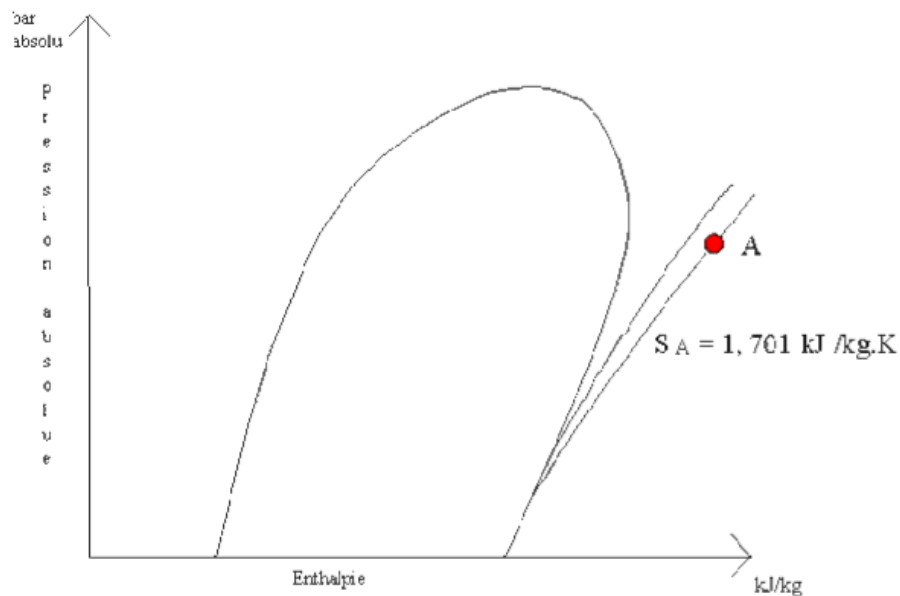


Figure 16- diagramme enthalpique (L'échelle de l'entropie)

- Entropie en A = $1,701 \text{ kJ} / \text{kg.K}$ Symbole de l'entropie : s ; Unité de l'entropie : $\text{kJ} / \text{kg.K}$

➤ **Le titre**

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

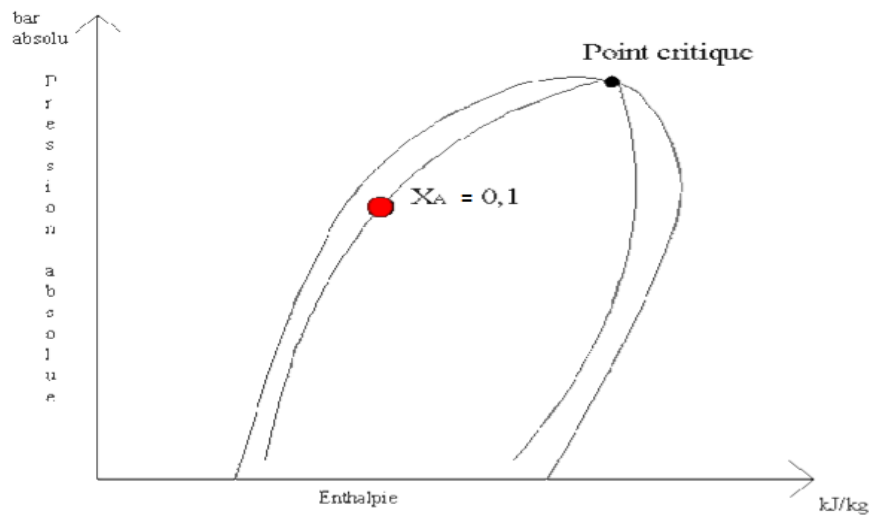


Figure 17- diagramme enthalpique (L'échelle de titre)

- Titre en A = 0,1 (10 % de vapeur et 90 % de liquide) symbole du titre : x ; Unité : %

VII.3 Utilisation du diagramme enthalpique

Un système frigorifique se définit toujours par rapport à ces températures de fonctionnement. La température de condensation qui dépend de la température du médium de condensation de l'air ou de l'eau. La température d'évaporation qui dépend de la température de conservation et de l'humidité relative.

1. Détermination de la température de condensation

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

Le ΔT total du condenseur est de 10 °C (donnée constructeur issue de la sélection du condenseur). Il est impératif de choisir un condenseur avec un ΔT total le plus faible possible pour avoir une consommation énergétique la plus faible possible.

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

Température de condensation (T_k) = Température de l'air extérieure + ΔT total du condenseur.

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

2. Détermination de la température d'évaporation

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

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

La température d'évaporation (T_0) sera donc de : Température d'évaporation (T_0) = Température de la chambre froide - ΔT total à l'évaporateur

$$T_0 = (-5) - 5 = -10\text{ °C}$$

3. La surchauffe des vapeurs à la sortie de l'évaporation

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

La surchauffe est de 5 °C (valeur usuelle généralement mesurée) La température au point 9 sera donc de : $T_9 = T_0 + 5\text{ °C}$

$$T_9 = (-10) + 5 = -5\text{ °C}$$

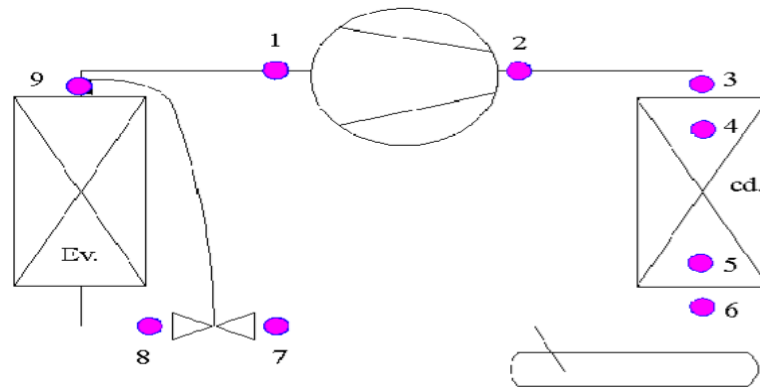


Figure 18- Schéma fluide de l'installation et points caractéristiques

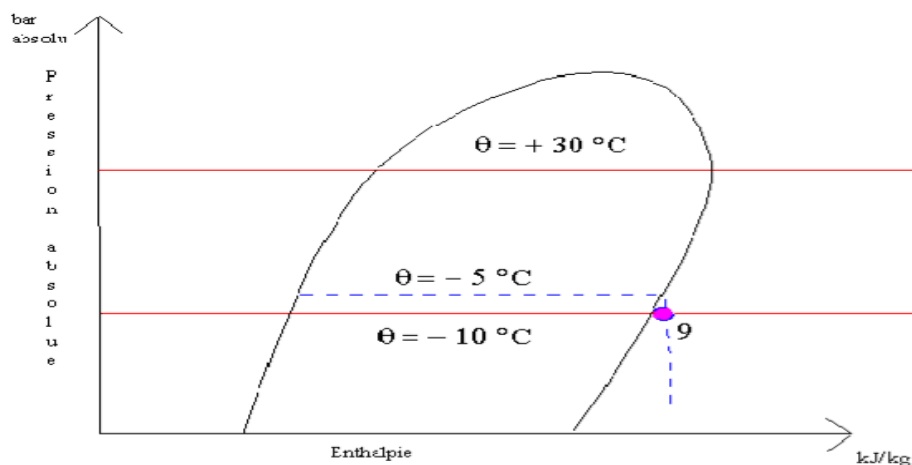


Figure 19- La température de surchauffe des vapeurs à la sortie de l'évaporation

VIII. Humidification de l'air

Deux procédés différents existent et peuvent être mis en place pour augmenter le degré d'humidité de l'air :

- L'humidification isotherme
- L'humidification adiabatique

VIII.1 Humidification isothermique

Le processus d'humidification isothermique consiste en l'introduction dans un environnement de vapeur d'eau générée par ébullition (l'eau est portée jusqu'à ébullition pour être dispersée dans l'air). Ce processus nécessite qu'une source externe apporte l'énergie nécessaire au changement d'état de l'eau cependant comme la masse de la vapeur est inférieure à celle de l'air, la température de l'air reste stable. Les humidificateurs à vapeur garantissent une sûreté hygiénique, la vaporisation évite le développement de micro-organismes potentiellement dangereux.

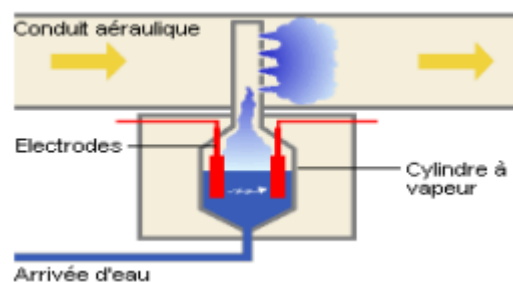


Figure 20- Humidificateur à vapeur

VIII.2 Humidification adiabatique

Le processus d'humidification adiabatique consiste en l'évaporation directe de l'eau dans l'air sans apport d'énergie extérieure : l'eau est finement pulvérisée pour maximiser la superficie de contact avec l'air et est absorbée. L'air, qui cède sa chaleur lors de la transformation de l'eau en vapeur, diminue sa température. La chaleur nécessaire à l'évaporation n'est pas fournie par une source externe mais par l'air. La consommation électrique des humidificateurs adiabatiques est très limitée.

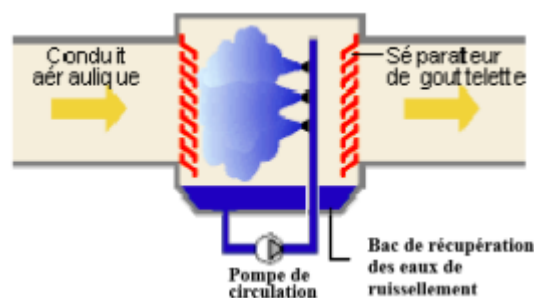


Figure 21- Humidificateur injection d'eau liquide

VIII.3 Technologies d'humidification de l'air

Les procédures de l'humidification se scindent en différentes technologies dont le choix dépend du type d'utilisation du local

VIII.3.1 Les systèmes à vapeur

Consomment d'importantes quantités d'énergie électrique. De plus, un tel processus d'humidification provoque une augmentation de la température de l'air pas toujours désirable.

VIII.3.2 Les systèmes type « laveur »

Ont comme principe de faire passer l'air à travers un rideau d'eau. L'air se charge d'humidité et se refroidit. L'énorme désavantage de ces systèmes est qu'il faut recycler l'eau de nombreuses fois.

Dans ce processus il est difficile et coûteux de combattre la prolifération bactérienne, source de maladies pour les occupants du bâtiment.

VIII.3.3 Les systèmes à pulvérisation fine

En pulvérisant un fin brouillard d'eau, ceci permet à l'air d'absorber l'intégralité de celui-ci. Le recyclage de l'eau n'est pas nécessaire. L'élimination des problèmes liés à la prolifération bactérienne est dès lors assurée ; tout surplus d'eau est systématiquement évacué.

Le tableau.5 présenté les différents types d'humidificateur

Types d'humidificateur	Fonctionnement	Sous-types
Humidificateurs adiabatiques	Ils utilisent de l'eau qui est ensuite la chaleur nécessaire est fournie par l'air évaporée : qui se refroidit et, parallèlement, se charge en vapeur d'eau. La transformation est adiabatique : il n'y a pas augmentation de l'enthalpie (chaleur totale) mais une modification du rapport chaleur sensible/ chaleur latente apparaît.	• Humidificateur à pulvérisation avec recyclage par pompe • Humidificateur à pulvérisation à eau perdue • Humidificateur à ruissellement avec recyclage par pompe • Humidificateur à ruissellement à eau perdue
Humidificateurs à vapeur	Ils utilisent directement la vapeur d'eau produite par un générateur centralisé (chaudière, sous-station d'un réseau de chauffage) ou par un système autonome intégré.	• Humidificateur à vaporisation par générateur centralisé • Humidificateur à vaporisation par ébullition

Tableau.5 – Différents types d'humidificateur

IX. Applications industrielles du froid

- **Domaine médical** : cryochirurgie, conservation de certains produits, organes...
- **Industries alimentaires** : conservation des aliments, pasteurisation des liquides...
- **Industries chimiques et pétrochimiques** : liquéfaction des gaz pour le transport, déparaffinage, débenzolage...
- **Génie civil** : refroidissement des bétons, congélation des sols aquifères...
- **Conditionnement des locaux** : rafraîchissement de l'air, conditionnement des patinoires, canons à neige...
- **Laboratoires d'essai et de recherche** : étude des matériaux et comportement de la matière à très basse température...
- **Production de neige carbonique** : maintien du froid à basse température

Le tableau ci-dessous fait un point des différentes applications du froid.

REFRIGERATION CLASSIQUE	GAMME DE TEMPERATURES (°C)	APPLICATIONS
Conditionnement d'air	+16 à +26	Confort humain
Réfrigération des denrées	0 à +10	Conservation des aliments à court/moyen terme
Congélations des denrées	-35 à 0	Conservation des aliments à long terme
Lyophilisation	-80 à -30	Dessiccation à basse température
Traitements divers	-200 à 0	Applications chimiques Essais thermiques des matériaux
CRYOGENIE	GAMME DE TEMPERATURES (°K)	APPLICATIONS
Liquéfaction du gaz naturel	93 à 113	Transport en phase liquide (méthanier)
Liquéfaction de l'air	70 à 80	Distillation
Liquéfaction de l'hydrogène	14 à 30	Recherche nucléaire
Liquéfaction de l'hélium	1 à 5	Supraconductivité
Méthodes magnétiques	10^{-3} à 10^{-2}	Recherche fondamentale

Tableau 6- différentes applications du froid

- **La cryogénie** est la branche du froid qui s'occupe de la production des très basses températures.

X. Production de froid

Toute transformation endothermique peut constituer un procédé capable de produire du froid soit:

- fusion d'un solide,
- sublimation d'un solide
- vaporisation d'un liquide
- détente d'un gaz
- dissolution des solides, liquides, gaz

La figure 22- donne les différents changements d'état possibles de la matière

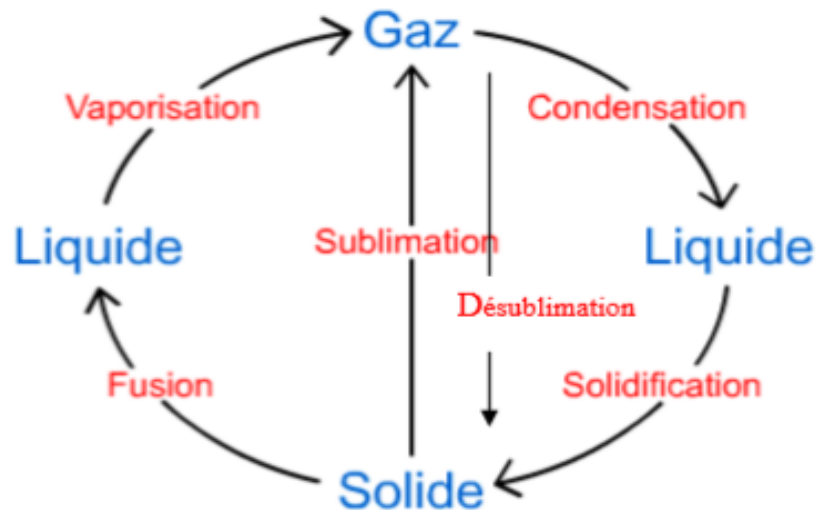


Figure 22 – Changements d'états de la matière

Les machines les plus courantes fonctionnent en vaporisant le fluide frigorigène dans la chambre froide. C'est précisément au cours de cette opération que la chaleur est absorbée.

❖ Remarque :

Si l'on désire une production continue de froid, il est nécessaire de réaliser un cycle, c'est à dire de combiner un phénomène exothermique à un phénomène endothermique. Les machines frigorifiques seront donc au moins bithermes.

XI. Conclusion

Dans ce Cours, nous avons présenté les techniques du froid et du conditionnement de l'air et maîtriser le principe de base de fonctionnement d'un circuit frigorifique, d'abord la technologie des installations frigorifiques.

Les principales conclusions qu'on peut tirer de cette étude sont :

- ❖ Chaque fluide frigorigène correspond un diagramme enthalpique.
- ❖ La condensation sera d'autant plus aisée que la chaleur massique de la vapeur saturante est faible
- ❖ Le fluide frigorigène permet les échanges de chaleur dans un système frigorifique par ses changements d'état que sont l'évaporation et la condensation.
- ❖ La machine frigorifique à compression de vapeur est composée de 4 organes principaux que sont : Evaporateur, Compresseur, Condenseur, Détendeur.
- ❖ Le diagramme enthalpique permet de suivre l'évolution de la pression, de la température, d'enthalpie, de l'entropie, du volume massique, du mélange liquide-vapeur d'un fluide frigorigène dans un système frigorifique.
- ❖ Les machines les plus courantes fonctionnent en vaporisant le fluide frigorigène dans la chambre froide.
- ❖ La cryogénie est la branche du froid qui s'occupe de la production des très basses températures.