



OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

VERSION EXPERIMENTALE

RESUME THEORIQUE

&

GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES

MODULE N 2°:

ETUDE THERMODYNAMIQUE DES
MACHINES FRIGORIFIQUES

SECTEUR : FROID ET GENIE THERMIQUE

SPECIALITE : FROID COMMERCIAL ET CLIMATISATION

NIVEAU : TECHNICIEN

MAI 2003

Remerciements

La DRIF remercie les personnes qui ont participé ou permis l'élaboration de ce Module de formation.

Pour la supervision :

GHRAIRI RACHID : Chef de projet du Secteur Froid et Génie Thermique

BOUJNANE MOHAMED : Coordonnateur de C D C du Secteur Froid et Génie Thermique à l'ISGTF

Pour l'élaboration :

Thami KADDARI ISTA Mâmora – Kénitra DR- Nort Ouest 1

Pour la validation

Mr . Abdelilah MALLAK : Formatrice à l'ISGTF
Mr . Hachemi SAFIH : Formateur à l'ISGTF
Mr. Ahmed BOUAFIA : Formateur à l'ISGTF
Mr BARZI Ahmed : Formateur à l'ISTA 1 Marrakech
Mr Hassan BEZZAZ : Formateur à l'ISTA 1 Marrakech
Mr Samir BELAID : Formateur à l'ISTA Kénitra
Mr Lahcen TABAT I: Formateur à l'ISTA Kénitra

Les utilisateurs de ce document sont invités à communiquer à la DRIF toutes les remarques et suggestions afin de les prendre en considération pour l'enrichissement et l'amélioration de ce programme.

**Monsieur Said SLAOUI
DRIF**

SOMMAIRE

	Page
<i>Présentation du module</i>	
<i>Résumé de théorie</i>	
I. LES CHANGEMENTS D' ETAT	6
II. RELATION PRESSION-TEMPERATURE	12
III. CIRCUIT FRIGORIFIQUE	13
III.1. Compresseur	13
III.2. Condenseur	19
III.3. Détendeur	20
III. 4 L'évaporateur	23
III.5 Circuit frigorifique	26
VI.6 DIAGRAMME ENTHALPIQUE	28
<i>GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES</i>	35
I. TP1.....	36
<i>Evaluation de fin de module</i>	51
<i>Liste bibliographique</i>	53
<i>Annexes</i>	

MODULE :**ETUDE THERMODYNAMIQUE DES MACHINES
FRIGORIFIQUES****Durée :75 H****60% : théorique****15% : pratique****OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT****COMPORTEMENT ATTENDU**

Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit expliquer le cycle de réfrigération par compression, selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.

CONDITION D'EVALUATION

- *A partir de mise en situation*
- *A l'aide de la documentation technique permise par l'enseignant*
- *A partir des consignes données par l'enseignant.*

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- *Justesse et exactitude des explications concernant les divers phénomènes physiques du cycle frigorifique.*
- *Exactitude de la location de ces phénomènes à l'intérieur du cycle frigorifique*
- *Utilisation appropriée de la terminologie.*

PRECISIONS SUR LE COMPORTEMENT ATTENDU	CRITERES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A- <i>Schématiser un cycle frigorifique par compression</i>	• <i>Connaissance exacte des composants de base du circuit frigorifique.</i> • <i>Représentation juste du circuit frigorifique</i>
B. <i>Représenter le cycle frigorifique par compression</i>	<i>Représentation juste du cycle frigorifique dans le diagramme enthalpique</i>
C. <i>Expliquer le phénomène d'échange de chaleur relative au cycle frigorifique</i>	• <i>Explication adéquate des phénomènes de transfert de chaleur dans un circuit frigorifique</i>
D. <i>Expliquer les quatre étapes du cycle frigorifique</i>	• <i>Explication correcte des phénomènes liés au changement d'état de fluide au niveau des éléments du circuit frigorifique</i>

CHAMP D'APPLICATION DE LA COMPETENCE

- *Domaines du Froid Commercial et Industriel (réfrigération, congélation)*

OBJECTIFS OPERATIONNELS DE SECOND NIVEAU

Le stagiaire doit maîtriser les savoir, savoir- faire, savoir percevoir ou savoir- être, jugés préalables aux apprentissages directement requis pour l'atteinte de l'objectif de premier niveau tels que :

Avant d'apprendre à schématiser le circuit frigorifique par compression (A) :

1. Décrire les principaux composants du circuit
2. Représenter exactement les liaisons entre les composants du circuit.

Avant d'apprendre à représenter le cycle frigorifique par compression (B)

3. Représenter correctement le cycle frigorifique dans le diagramme enthalpique

Avant d'apprendre à expliquer le phénomène d'échange de chaleur relatif au cycle frigorifique (C)

4. Expliquer correctement les phénomènes d'échange de chaleur

Avant d'apprendre à expliquer les quatre étapes du cycle frigorifique (D)

5. Expliquer correctement les phénomènes liés à l'état du fluide frigorifique au niveau du circuit frigorifique

PRESENTATION DU MODULE

*Le présent module **ETUDE THERMODYNAMIQUE DES MACHINES FRIGORIFIQUES** se situe parmi les modules qualifiants des formations froid industriel et froid commercial et climatisation.*

Ce module porte sur :

- L'étude des transformations thermodynamiques des fluides frigorigènes d'un circuit frigorifique à compression*
- La maîtrise du diagramme enthalpique*

Le volume théorique est de 60 heures

Le volume pratique est de 15 heures

***Module N°3: RESUME THEORIQUE
ETUDE THERMODYNAMIQUE DES MACHINES
FRIGORIFIQUES***

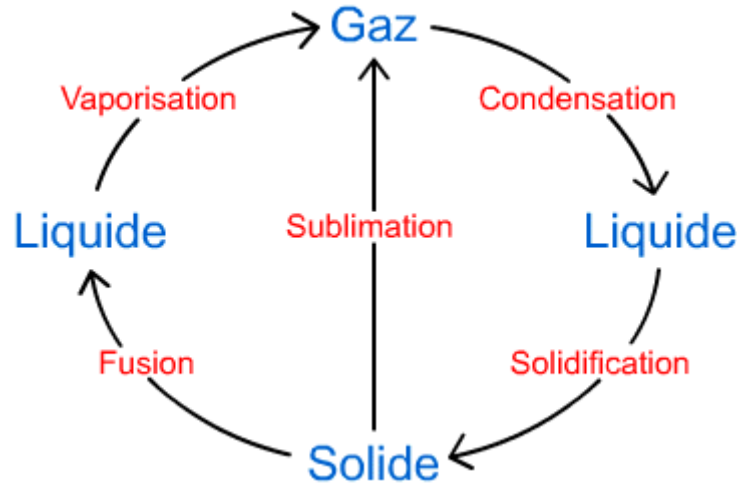
I. Les changements d'état

Définitions :

Un corps physique peut prendre 3 états :

Solide, liquide ou gazeux.

Chaque passage d'un état à l'autre s'appelle changement d'état.



La fusion :

C'est le passage de l'état solide à l'état liquide. Ce changement d'état s'obtient en apportant de la chaleur au corps que l'on désire faire changer d'état. Pour l'eau, on dira que la glace fond.

La vaporisation :

C'est le passage de l'état liquide à l'état gazeux. Ce changement d'état s'obtient en apportant de la chaleur au corps que l'on désire faire changer d'état. Pour l'eau, on dira qu'elle bout.

La condensation :

C'est le passage de l'état gazeux à l'état liquide. Pour réaliser ce changement d'état, le corps doit céder de la chaleur.

La solidification :

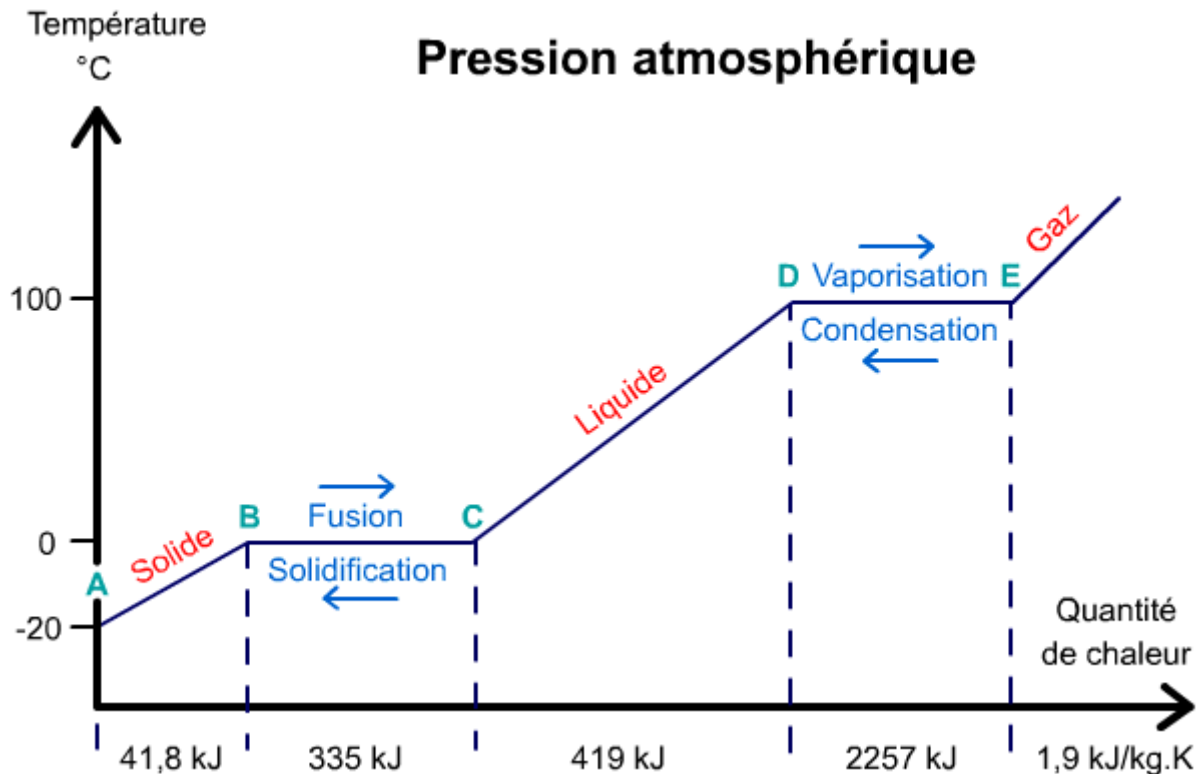
C'est le passage de l'état liquide à l'état solide. Pour réaliser ce changement d'état, le corps doit céder de la chaleur. On dira pour l'eau qu'elle gèle.

La sublimation :

C'est le passage direct l'état solide à l'état gazeux sans passer par l'état liquide. Pour réaliser ce changement d'état, le corps doit prendre de la chaleur au milieu ambiant. ce changement d'état s'obtient dans des conditions de pression et de température particulières. Le corps le plus connu qui réalise ce changement d'état est la naphtaline (boule anti-mites).

Exemple de l'eau :

Si nous partons d'un bloc de glace de 1kg à -20°C , sous pression atmosphérique, et que nous le chauffons. Nous allons rencontrer plusieurs étapes fondamentales dans la transformation de ce bloc de glace...

**De A à B :**

La température de la glace augmente régulièrement pour atteindre 0°C . La chaleur apportée et nécessaire à cette étape est de 41,8 kJ. C'est de la chaleur sensible (la température augmente).

En B :

On a un bloc de glace de 1kg à 0°C .

De B à C :

A 0°C , la 1^{ère} goutte de liquide apparaît et la glace commence à fondre. Pendant toute la fonte de la glace, le mélange liquide/solide aura une température rigoureusement égale à 0°C . La chaleur apportée est de 335 kJ, c'est de la chaleur latente (la température reste constante).

En C :

On a 1kg d'eau entièrement liquide à 0°C .

De C à D :

La température de l'eau s'élève progressivement jusqu'à atteindre 100°C . Pour réaliser cette augmentation de température, nous devons apporter 419 kJ. C'est de la chaleur sensible.

En D :

On a 1kg d'eau entièrement liquide à 100°C , c'est du liquide saturé.

De D à E :

A 100°C , comme nous continuons à apporter de la chaleur, l'eau se met à bouillir et la première molécule de vapeur apparaît. C'est le début de l'évaporation. La température reste constante pendant tout le changement d'état. Quand la dernière goutte de liquide s'évapore, le changement d'état sera terminé, nous aurons apporté 2257 kJ de chaleur latente.

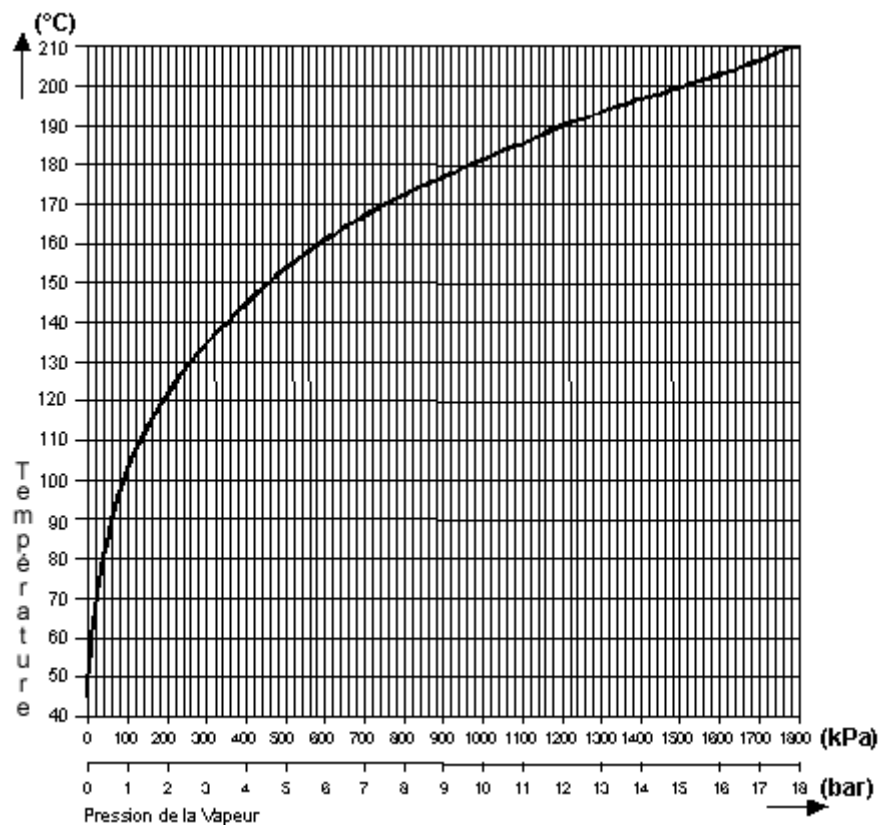
En E :

Nous avons 1kg de vapeur à 100°C , c'est de la vapeur saturée.

Après E :

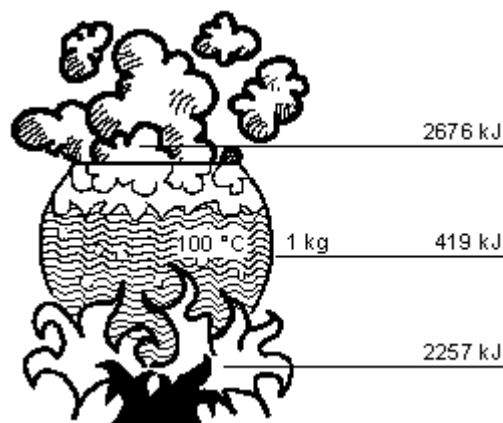
Si on continue à chauffer la vapeur, la température continue d'augmenter nécessitant $1,9 \text{ kJ/kg.K}$.

Evolution des températures de changements d'état en fonction de la pression :



Plus la pression est élevée et plus la température du changement d'état augmente.
Exemple : à 1,5 bar l'eau bout à 110°C

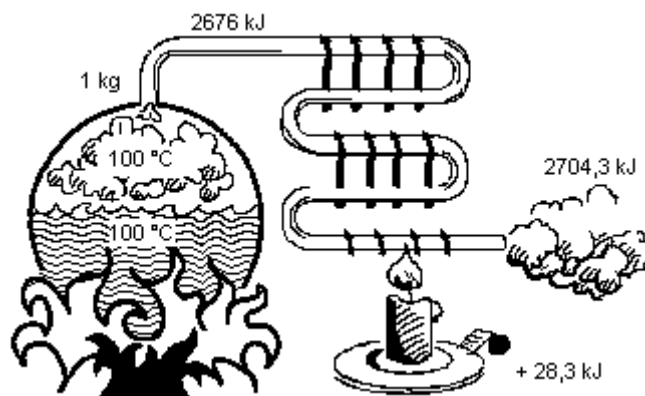
Notion d'enthalpie :



Nous avons vu qu'il fallait apporter 2257 kJ de chaleur à l'eau pour l'évaporer et donc la

convertir en 1kg de vapeur à 100°C. Si nous ajoutons les 419 kJ nécessaires pour chauffer 1kg d'eau de 0 à 100°C, on obtient alors 2676 kJ, la teneur en chaleur ou en enthalpie d'1 kg de vapeur saturée à 100°C. (Le point 0 de l'échelle d'enthalpie est fixé à une température de matière de 0°C).

Notion de surchauffe :



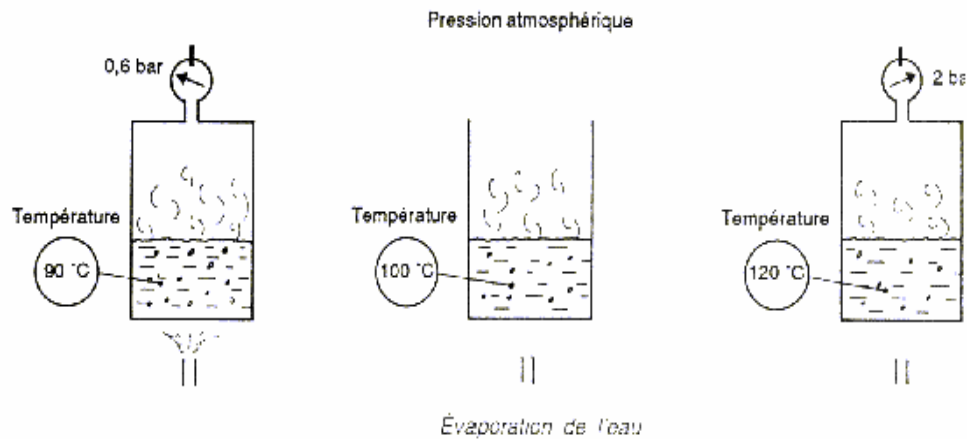
Si nous ajoutons de la chaleur à la vapeur saturée sèche à 100°C, il se produit une augmentation de température appelée surchauffe. La chaleur de surchauffe est de la chaleur sensible. pour augmenter 1kg de vapeur sèche à 100°C de 15K, on doit fournir 28,3 kJ. L'enthalpie de cette vapeur d'eau à 115°C est de $2676+28,3=2704,3$ kJ.

Notion de sous-refroidissement :

De même si on extrait de la chaleur à de l'eau qui vient de se condenser, on la sous-refroidit. Ainsi sous pression atmosphérique, de l'eau à 80°C est sous-refroidit de 20°C. L'enthalpie de l'eau à 80°C est de :
$$h = 419 - 20 \times 419 / 100 = 335,2 \text{ kJ/kg.}$$

II. RELATION PRESSION-TEMPÉRATURE

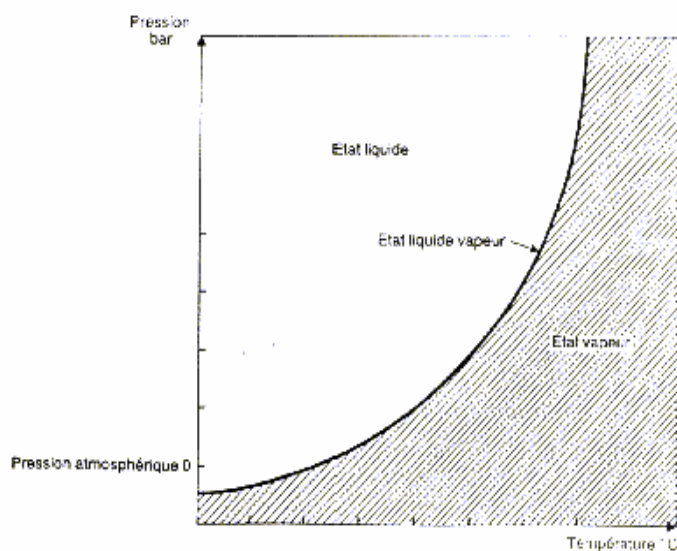
A la pression atmosphérique, l'eau bout (s'évapore) à une température de 100 °C. Il est possible de la faire bouillir à une température différente à condition de modifier la pression à sa surface (Figure 5).



"LA PRESSION ET LA TEMPÉRATURE SONT LIÉES POUR UN FLUIDE À L'ÉTAT LIQUIDE-VAPEUR."

Les diagrammes visualisent la relation pression-température

- d'une façon générale
- pour l'eau et le R22



III. Circuit frigorifique.

Appareils principaux :

- Compresseur
- Condenseur
- Détendeur
- Evaporateur

3-1. Compresseur

Le compresseur : -pompe aspirante et refoulante- aspire les vapeurs froides provenant de l'évaporateur (BP) et restitue au refoulement des vapeurs comprimées et surchauffes (HP).

Le fluide a subi une compression polytropique qui a eu pour effet d'élever la température du fluide refoulé.

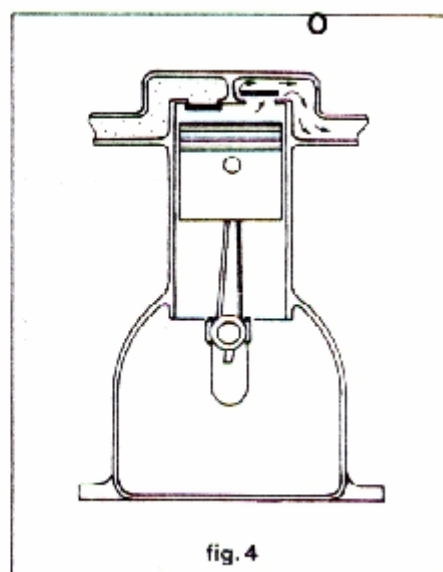
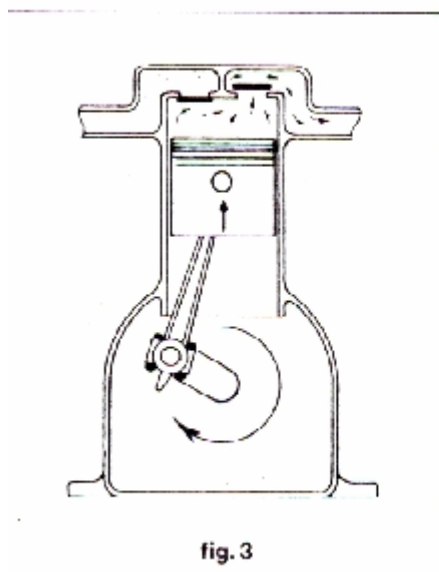
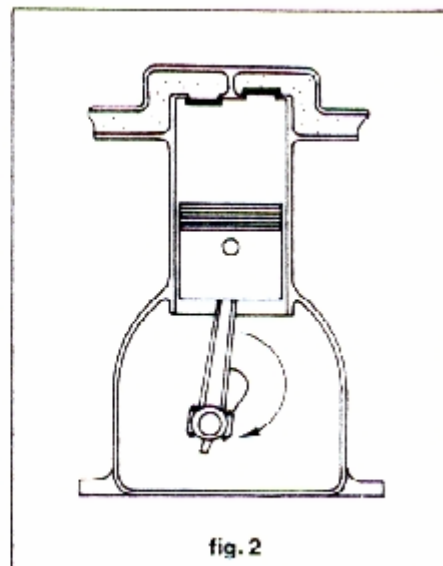
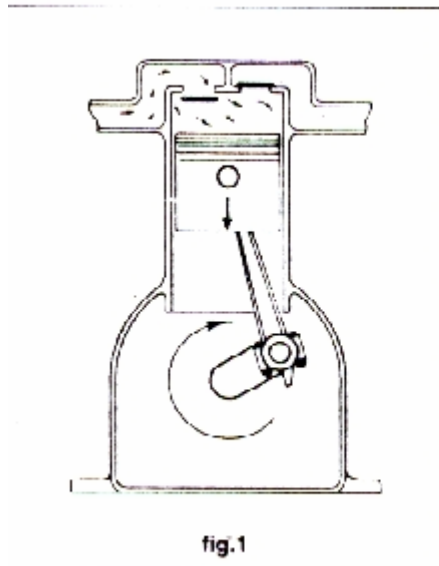


Figure 1

*Le piston amorce sa course descendante qui crée une dépression dans le cylindre;
La pression dans la conduite d'aspiration amorce le clapet d'aspiration à s'ouvrir.
La pression dans la conduite de refoulement maintient le clapet de refoulement fermé.*

Figure 2

Le piston commence sa course ascendante de compression. La pression en montant dans le cylindre fait fermer le clapet d'aspiration. Mais la pression dans le cylindre est encore insuffisante pour permettre la levée du clapet de refoulement fermé.

Figure 3

La pression dans le cylindre a augmenté jusqu'à dépasser légèrement la haute pression. Le clapet de refoulement se soulève et le gaz comprimé s'échappe dans la conduite de refoulement.

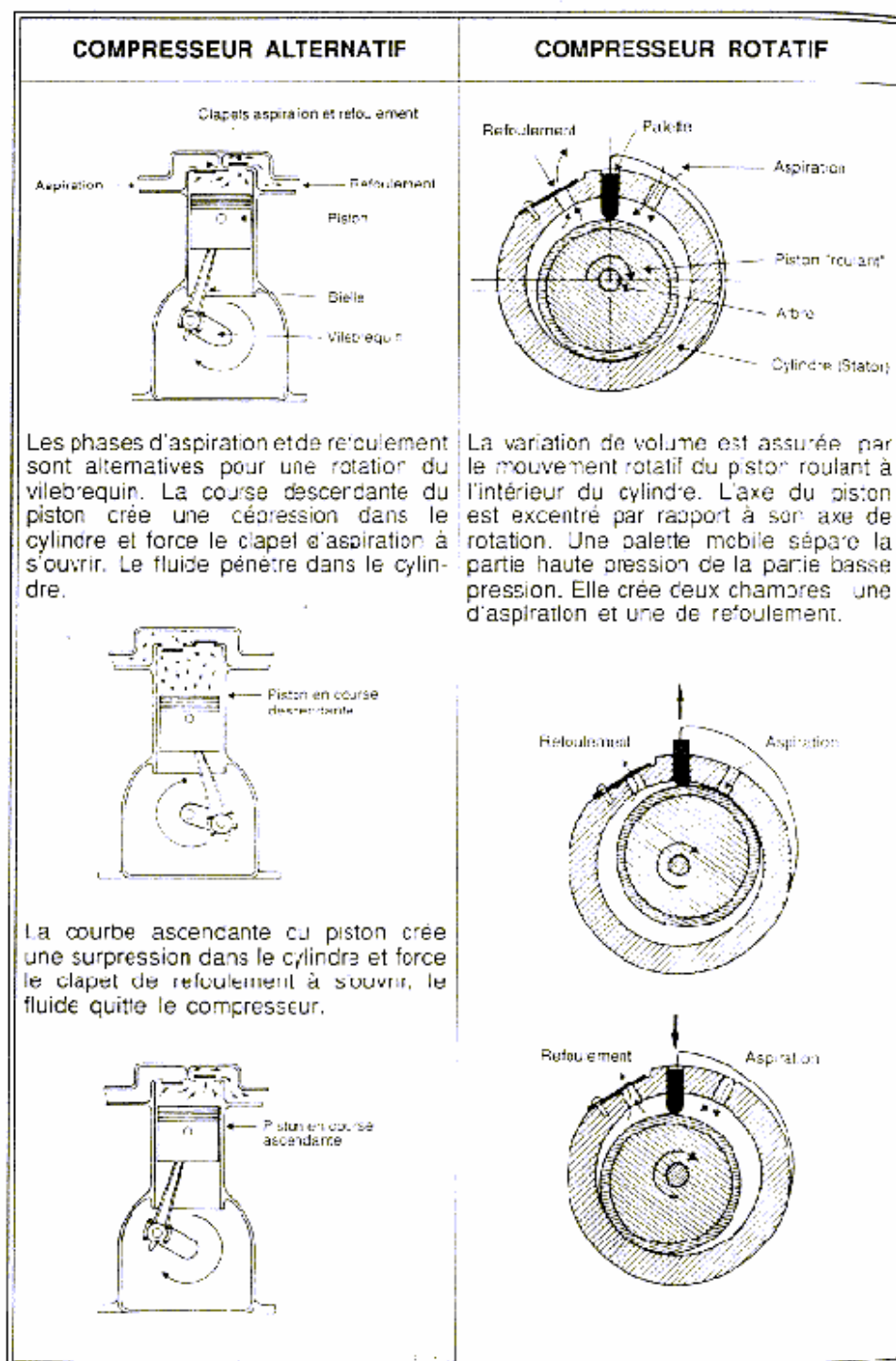
Figure 4

Le piston finit sa course ascendante au point mort haut ; on constate qu'un espace (mort ou nuisible) rempli de vapeur haute pression reste entre le haut du piston et le fond du cylindre, cet espace n'est jamais balayé par le piston.

Figure 1

Au cours de sa course descendante le clapet d'aspiration ne s'ouvrira que lorsque la pression dans le piston sera légèrement inférieure à celle existant dans la conduite d'aspiration.

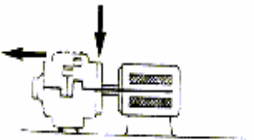
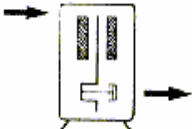
3-1-1



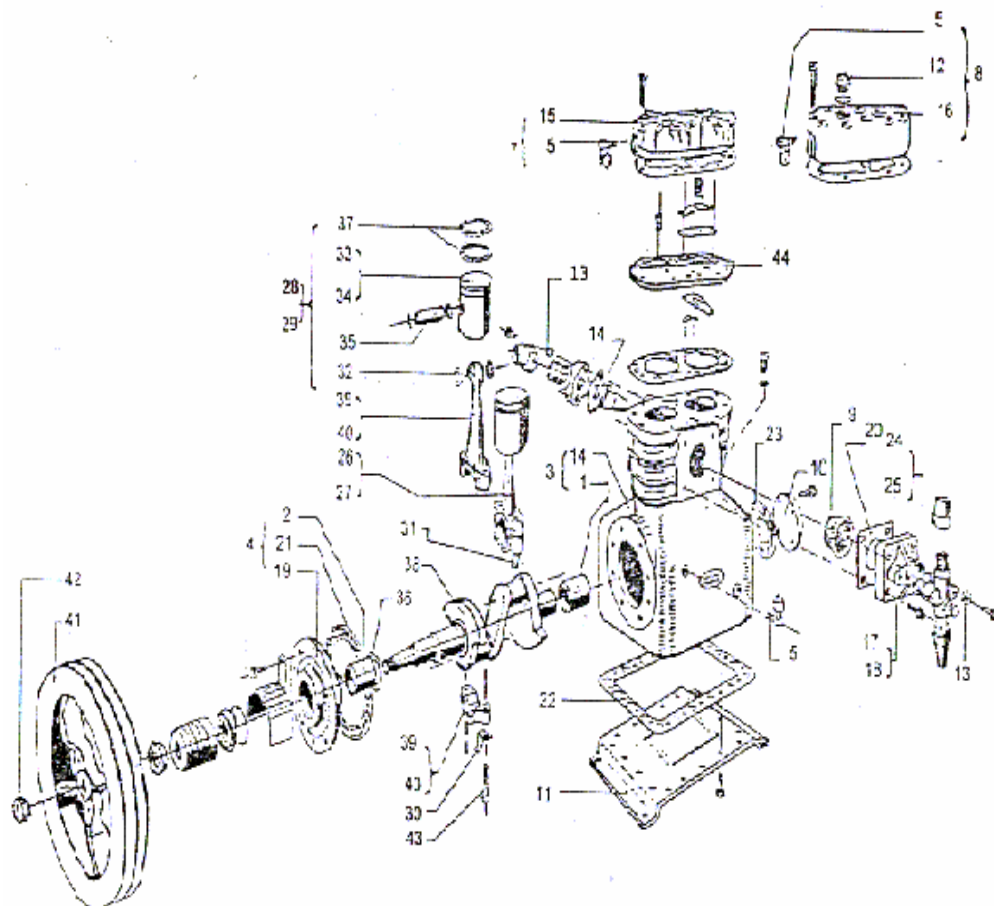
3-1-2

COMPRESSEUR ALTERNATIF-HERMÉTIQUE, COMPRESSEUR ROTATIF-HERMÉTIQUE

Un compresseur est constitué d'un ensemble compression (vilebrequin, bielle, piston...) et d'un ensemble moteur. En fonction du mode d'accouplement et de l'accessibilité aux pièces mécaniques du compresseur une classification a été élaborée.

COMPRESSEUR DE TYPE		
Ouvert	Hermétique accessible ou semi-hermétique	Hermétique
L'entraînement du compresseur est effectué par un moteur (électrique, thermique) extérieur au compresseur. L'accouplement entre les deux ensembles est soit à courroie, soit direct. Le démontage du compresseur pour les opérations de maintenance est aisé. 	L'ensemble compression-moteur est accouplé en mode direct à l'intérieur d'un corps en fonte usiné et assemblé. L'accès aux différents organes du compresseur est possible. 	Comme pour le compresseur semi-hermétique, l'ensemble compression-moteur est accouplé en mode direct. Cependant l'ensemble est logé dans un corps en métal embouti puis soudé. L'accessibilité aux différents organes du compresseur est impossible. 
Suivant le domaine d'utilisation, le fluide frigorigère employé, la puissance nécessaire..., les constructeurs utilisent un des trois types de compresseur.		

Vue éclatée d'un compresseur ouvert à piston



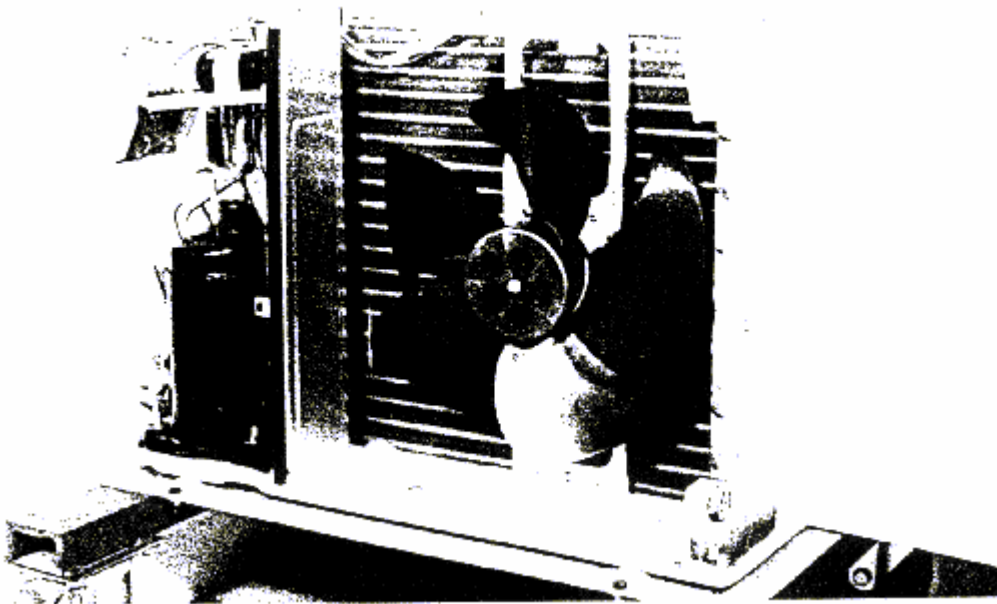
Vue éclatée d'un compresseur à piston ouvert

1. Coussinet du carter
2. coussinet du moyeu
3. Carter avec coussinet
4. moyeu avec coussinet et joint
5. Equerre 1/4 SAE * 1/8 NPT
6. Jeu complet de joints
7. Tête à air avec équerre et joints
8. Tête à eau avec vis complète
9. Filtre d'aspiration
10. Bouchon de poussée
11. Fond de carter
12. Raccord tête à eau
13. Entretoise vis de vanne
14. Carter nu
15. Tête refroidie à air
16. Tête refroidi à eau
17. Regard aspiration
18. Regard aspiration
19. Moyeu nu
20. Joint regard d'aspiration
21. Joint de moyeu
22. Joint fond de carter
23. Joint vanne d'aspiration et refoulement
24. Joint vanne aspiration
25. Joint vanne aspiration
26. Bielle avec piston en fonte en aluminium
27. Bielle avec piston en fonte complets
28. Piston alum, avec axe et segments
29. Piston en fonte avec axe et segment
30. Graisseur droit
31. Graisseur gauche
32. Rondelle de bielle
33. Piston en aluminium
34. Piston en fonte
35. Axe
36. Rondelle de poussée
37. Segment de refoulement
38. Vilbrequin
39. Bielle en fonte avec vis
40. Bielle en aluminium
41. Volant 2 gorges A
42. Ecrou volant
43. Vis tête de bielle
44. Plaque porte clapets complète

3-2. Condenseur

Le rôle du condenseur est d'évacuer la chaleur absorbée à l'évaporateur et au compresseur par le fluide frigorigène. Le fluide extérieur à réchauffer est soit de l'air, soit de l'eau.

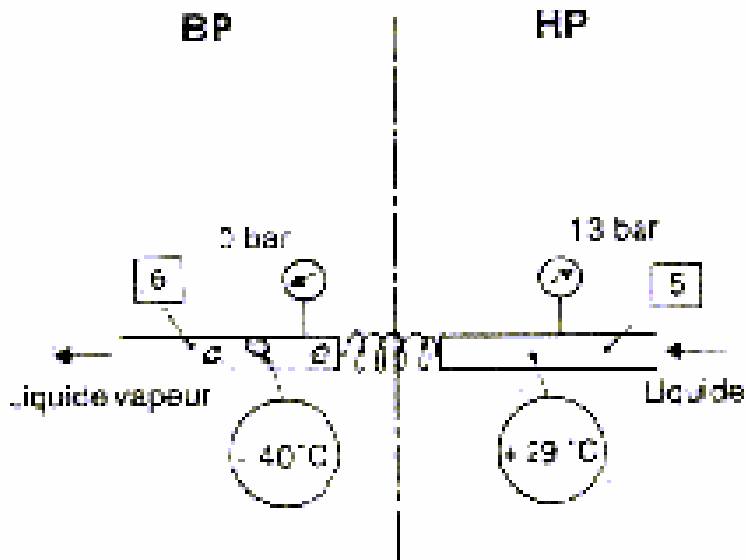
Le type le plus courant est le condenseur à tubes ailettés avec un ou plusieurs ventilateurs hélicoïdes ou centrifuges. Les tubes sont reliés en série ou en série parallèle entre deux collecteurs, d'alimentation en vapeur surchauffée de frigorigène et un collecteur départ liquide. Le diamètre des tubes varie de 9 à 16mm, ils sont généralement en cuivre. Les ailettes en aluminium sont fixées par sertissage sur le tube. Leur pas (écartement entre deux ailettes) varie de 1 à 4mm.



Dans les condenseurs, les vapeurs de fluide frigorigène se refroidissent (désurchauffe) avant l'apparition de la première goutte de liquide (point 3). La condensation s'effectue jusqu'à la disparition de la dernière bulle de vapeur (point 4). Le fluide liquide peut se refroidir de quelques degrés (sous refroidissement) avant de quitter le condenseur.

3-3. Détendeur

La différence de pression entre le condenseur et l'évaporateur nécessite d'insérer un dispositif abaisseur de pression dans le circuit. C'est le rôle du détendeur. Le fluide frigorigène se vaporise partiellement dans le détendeur pour abaisser sa température.



3-3-1. Tube capillaire

C'est un tube en cuivre de très petit diamètre dont la section intérieure est calibre. Sa longueur et son diamètre sont fonctions du débit de fluide frigorigène nécessaire à l'évaporateur. Il est robuste, fiable, nécessite aucun réglage. Ce type de détendeur est utilisé dans les installations de faible puissance pour lesquels la charge calorifique varie peu.

A l'arrêt du compresseur, les pressions s'égalisent ce qui facilite son démarrage. Le tube capillaire exclut la possibilité de l'implantation d'une réserve de fluide frigorigène liquide entre le condenseur et lui-même.

3-3-2. Détendeur thermostatique

Rappelons que la surchauffe correspond à la différence de température existant entre les vapeurs sortant de l'évaporateur et la température d'évaporation.

Le détendeur thermostatique, organe de détente automatique, règle l'injection de liquide frigorigène de façon à maintenir constante la surchauffe des vapeurs sortant de l'évaporateur. Un détendeur thermostatique est équipé d'un corps de vanne muni d'un orifice fixe et d'un pointeau mobile. La position du pointeau est contrôlée à partir d'un ensemble composé d'un soufflet, d'un train thermostatique et de ressort de réglage. D'un côté du soufflet règne la pression d'évaporation, de l'autre côté du soufflet règne la pression liquide-vapeur du capillaire correspondant à la température du bulbe du train thermostatique. Le train thermostatique est l'ensemble bulbe-capillaire, soufflet. À l'intérieur le fluide est à l'état liquide-vapeur. Le bulbe est fixé à la sortie de l'évaporateur

et contrôle la température des vapeurs surchauffées sortant de l'évaporateur. La pression régnant à l'intérieur du train thermostatique est fonction de sa température du bulbe.

En cas de diminution de la charge thermique de l'évaporateur, la température du bulbe va diminuer, entraînant ainsi la fermeture du pointeau du détendeur jusqu'à obtention à nouveau de la même surchauffe des vapeurs.

En cas d'augmentation de la charge thermique de l'évaporateur, la température du bulbe va augmenter, entraînant ainsi l'ouverture du pointeau du détendeur jusqu'à obtention à nouveau de la même surchauffe des vapeurs. Les détendeurs thermostatiques sont équipés d'un ressort dont la force d'appui sur le soufflet est réglable, ce qui permet de régler la surchauffe.

Il existe deux classes de détendeurs thermostatiques :

- *Détendeur thermostatique à égalisation interne de pression.*
- *Détendeur thermostatique à égalisation externe de pression*

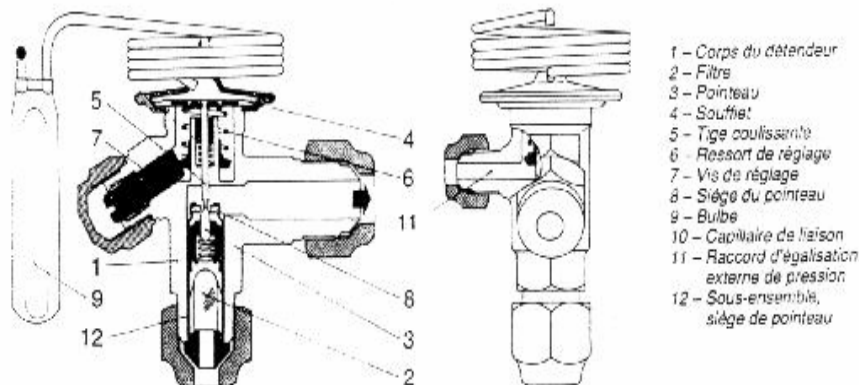
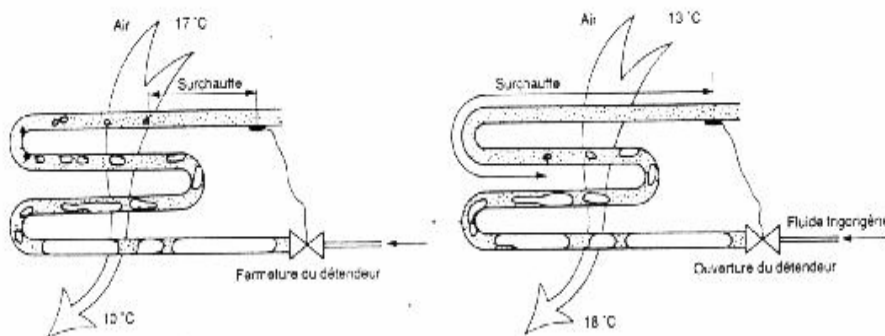
En cas de diminution de la charge thermique de l'évaporateur, la température du bulbe va diminuer, entraînant ainsi la fermeture du pointeau du détendeur jusqu'à obtention à nouveau de la même surchauffe des vapeurs.

En cas d'augmentation de la charge thermique de l'évaporateur, la température du bulbe va augmenter, entraînant l'ouverture du pointeau du détendeur jusqu'à obtention de la même surchauffe. Les détendeurs thermostatiques sont équipés d'un ressort dont la force d'appui sur le soufflet est réglable, ce qui permet de régler la surchauffe. Dans la pratique on adopte en général pour les climatiseurs une surchauffe comprise entre 5 °C et 6 °C.

Il existe deux classes de détendeurs thermostatiques :

- détendeur thermostatique à égalisation interne de pression,
- détendeur thermostatique à égalisation externe de pression.

Le domaine d'application du détendeur thermostatique, est celui de climatiseur de forte puissance (armoire de climatisation).



3-4. L'évaporateur

Le rôle de l'évaporateur est de prélever à basse température de la chaleur au fluide air ou eau, extérieur au circuit frigorifique, pour permettre l'évaporation du fluide frigorigène.

Un serpentin (évaporateur) a une extrémité en communication avec l'atmosphère, l'autre est raccorde à une bouteille de fluide frigorigène (R22)

Un ventilateur pulse de l'air sur le serpentin

Les mesures montrent que :

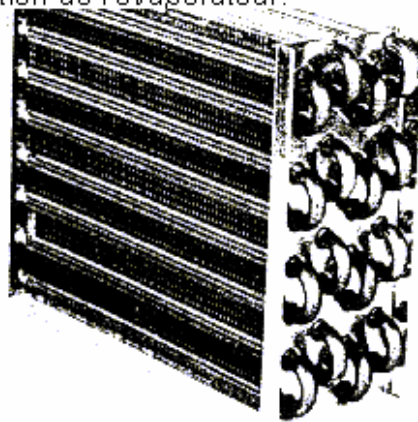
- *La pression atmosphérique règne dans le serpentin*
- *L'air se refroidit, donc cède de la chaleur au fluide frigorigène*
- *La température du fluide reste constante tant qu'il est en état liquide-vapeur*
- *Les vapeurs du fluide frigorigène s'échauffent après la disparition de la dernière goutte de liquide*

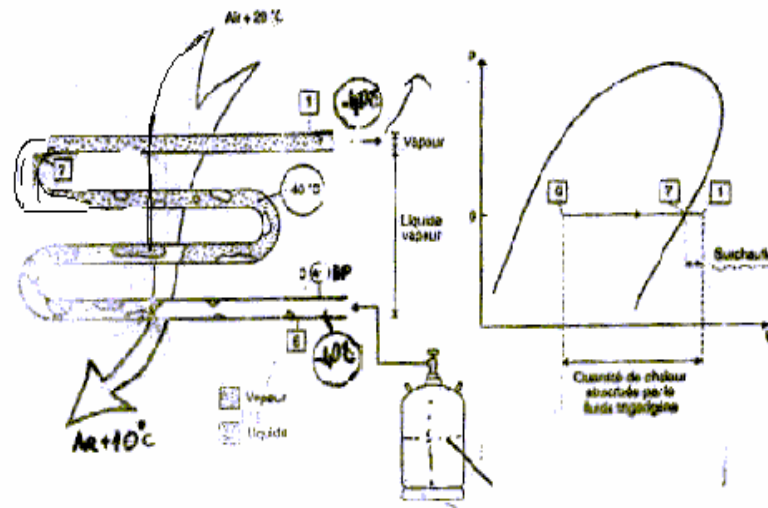
Ce système de reforestation pourrait donner satisfaction, mais malheureusement le fluide s'échappe dans l'atmosphère, ce qui est peu recommandable. Pourquoi ne pas établir un système ferme, il suffirait de condenser le fluide frigorigène et de le renvoyer dans la bouteille.

3-4-1. Evaporateur à air

Le type le plus rencontre est l'évaporateur à tubes à ailettes avec un ou plusieurs ventilateurs.

L'alimentation du fluide frigorigène s'effectue en série ou en parallèle. Lorsque plusieurs circuits sont alimentés en parallèles, un distributeur de liquide repartit le fluide frigorigène pour avoir une bonne alimentation de l'évaporateur.





3-4-2.

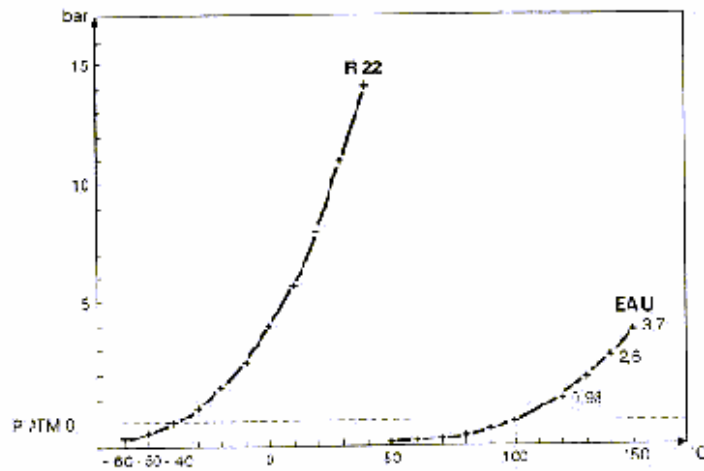


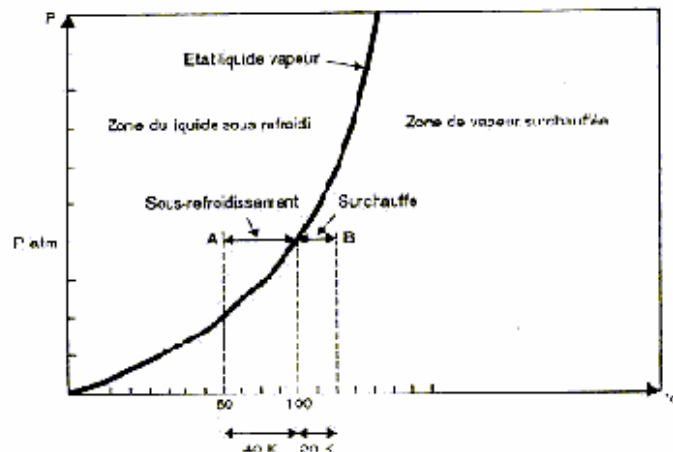
Diagramme pour l'eau et le R22

3-4-3. SURCHAUFFE, SOUS-REFROIDISSEMENT

La surchauffe est la différence entre la température du fluide à l'état vapeur et sa température de changement d'état (évaporation) liquide-vapeur à la même pression.

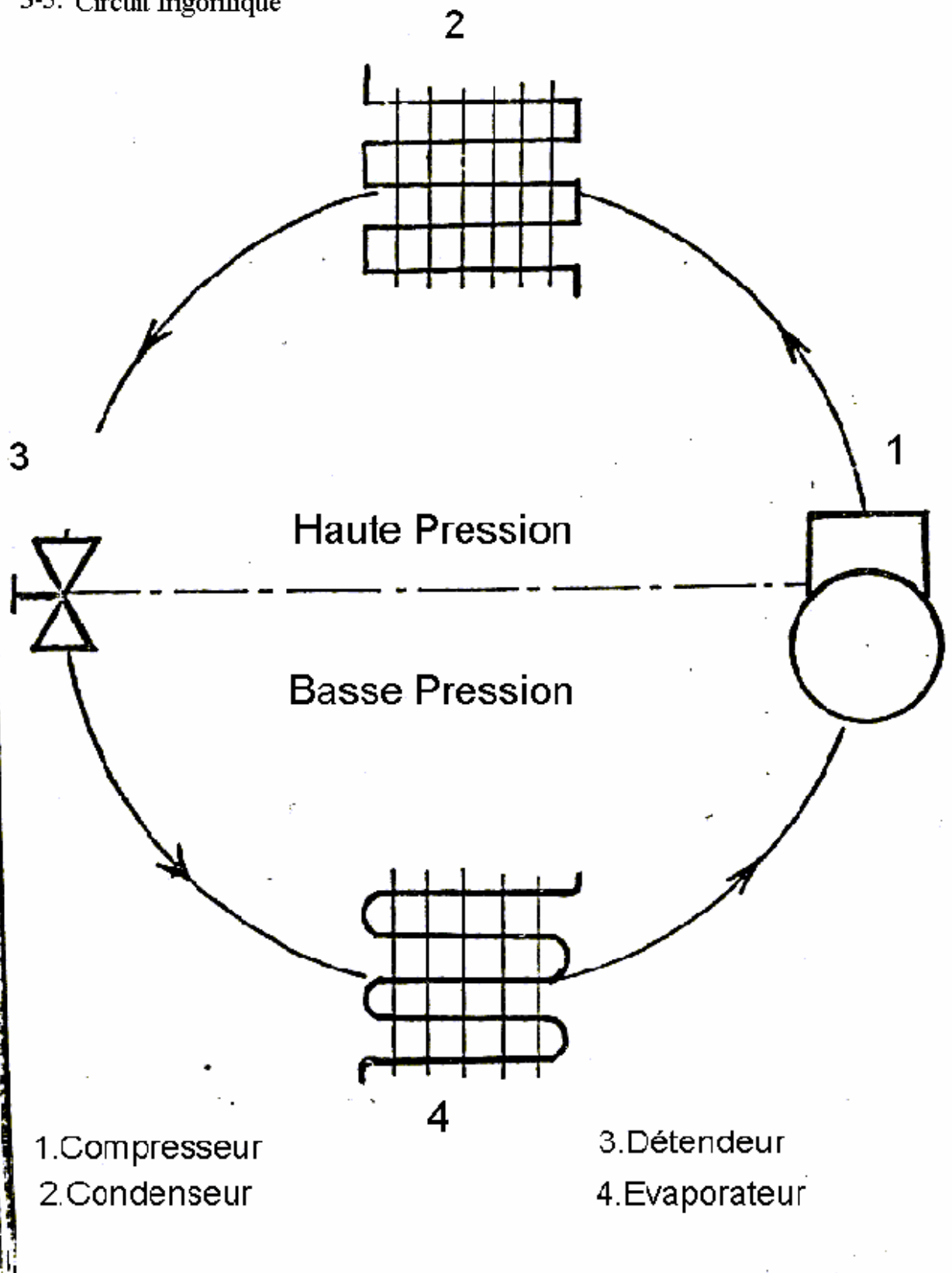
Le sous-refroidissement est la différence entre la température du fluide à l'état liquide et sa température de changement d'état (liquide-vapeur) à la même pression.

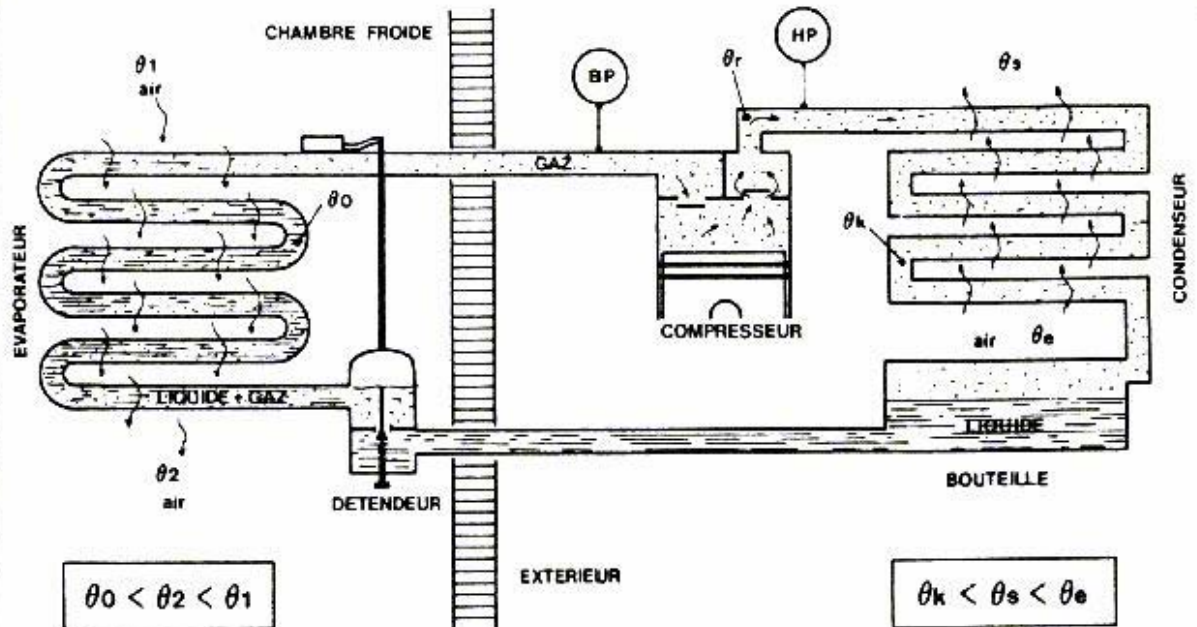
Sur la figure 8 qui visualise la relation pression-température de l'eau, le point A est sous-refroidi de 40 °C (eau à 60 °C) à la pression atmosphérique et le point B est surchauffé de 20 °C (vapeur d'eau à 120 °C) à la pression atmosphérique.



Relation pression-température pour l'eau

3-5. Circuit frigorifique





Le circuit frigorifique se compose de:

- un compresseur
- un condenseur
- une bouteille liquide
- un détendeur
- un évaporateur

Ces organes sont reliés entre eux par une tuyauterie formant ainsi un circuit fermé dans lequel circule le fluide frigorigène.

Selon l'endroit le fluide se trouve à l'état liquide ou gazeux.

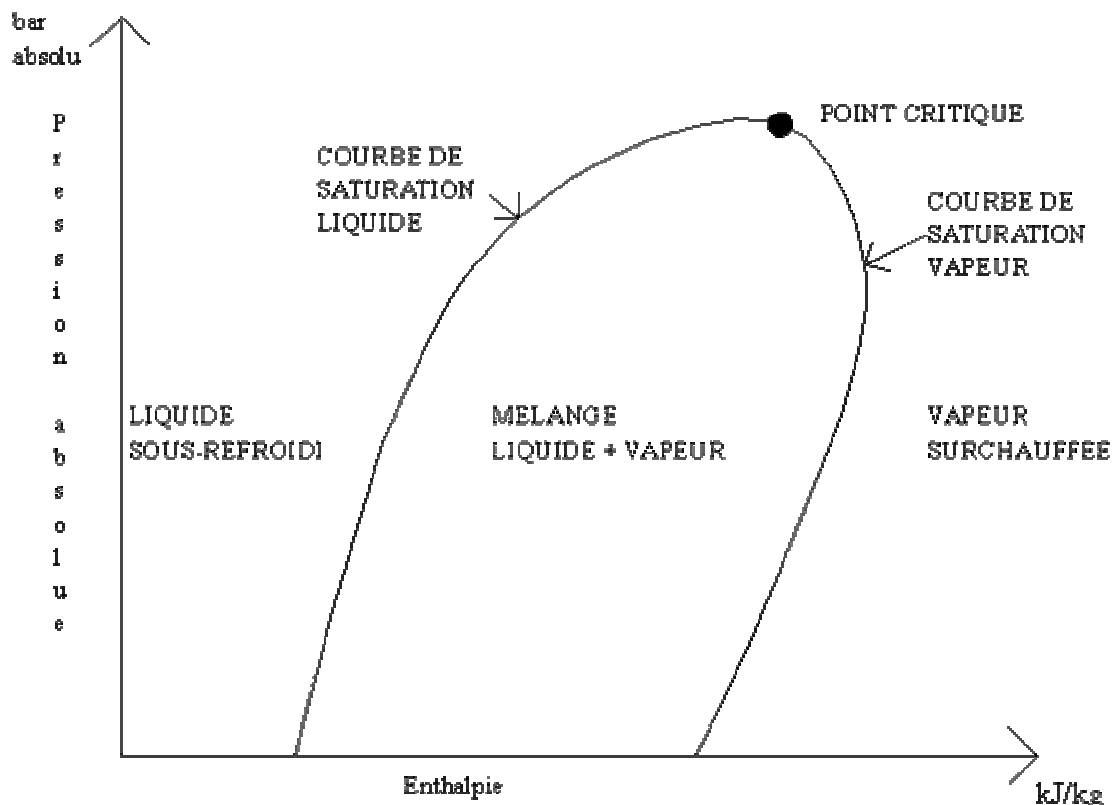
IV-Le diagramme enthalpique

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

Il existe un diagramme enthalpique pour chaque fluide frigorigène.

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

Présentation générale :



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

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

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

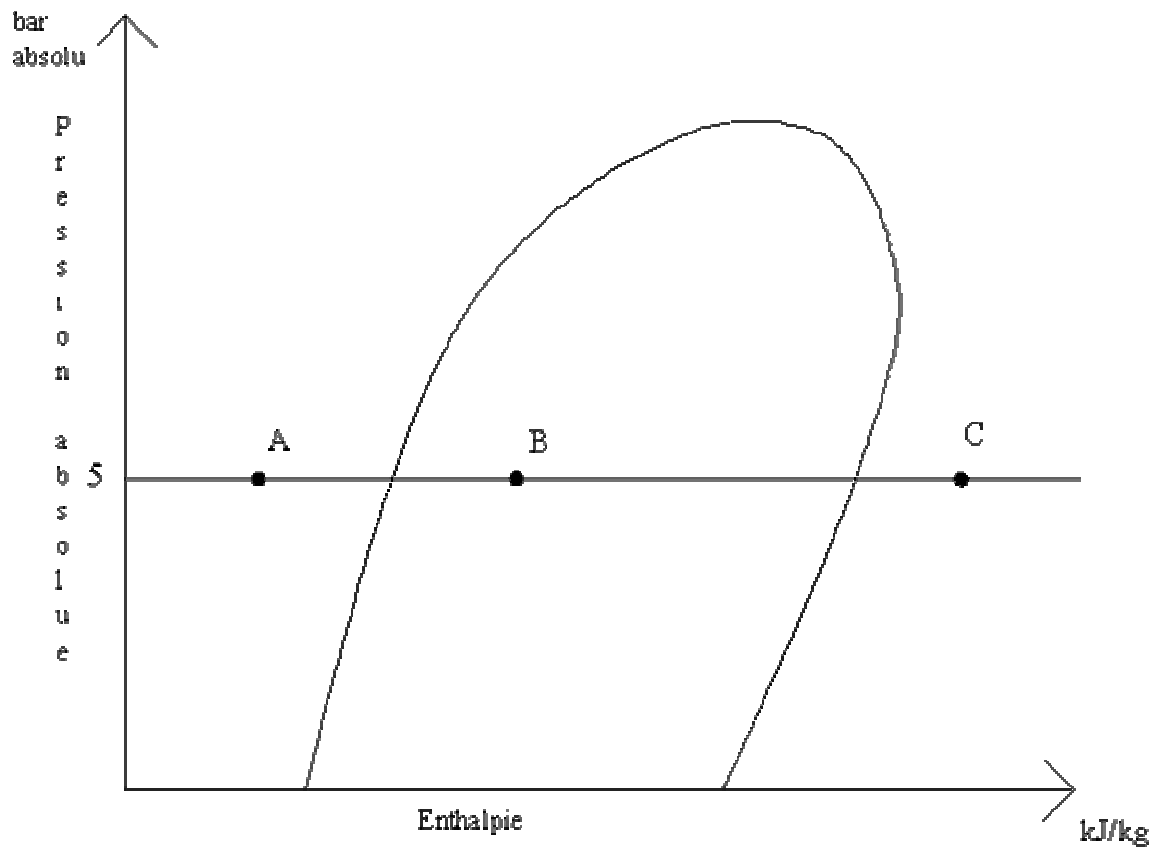
Ces trois zones correspondent aux différents états du fluide frigorigène dans un système frigorifique.

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

Evolution des différents paramètres :

La pression

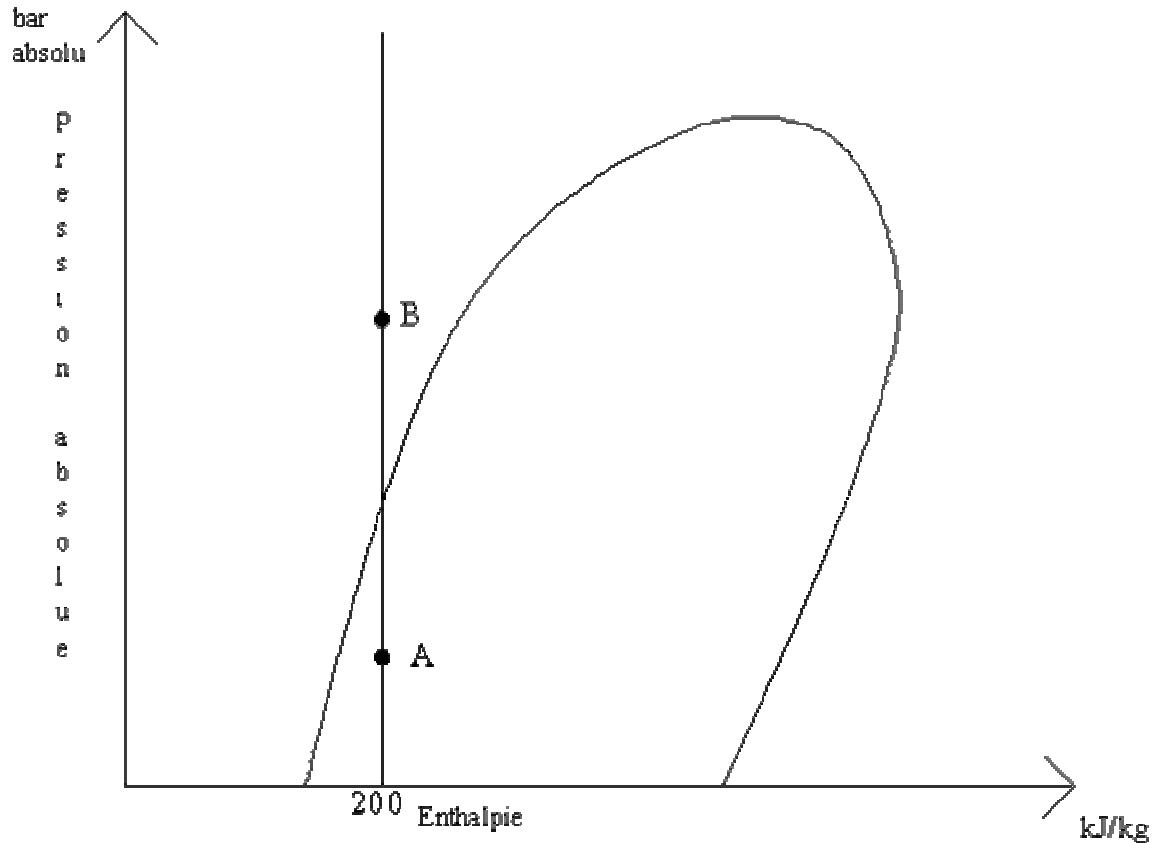
L'échelle des pressions évolue parallèlement à l'axe des enthalpies. Une transformation qui s'effectue à pression constante est une transformation ISOBARE.



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

L'enthalpie

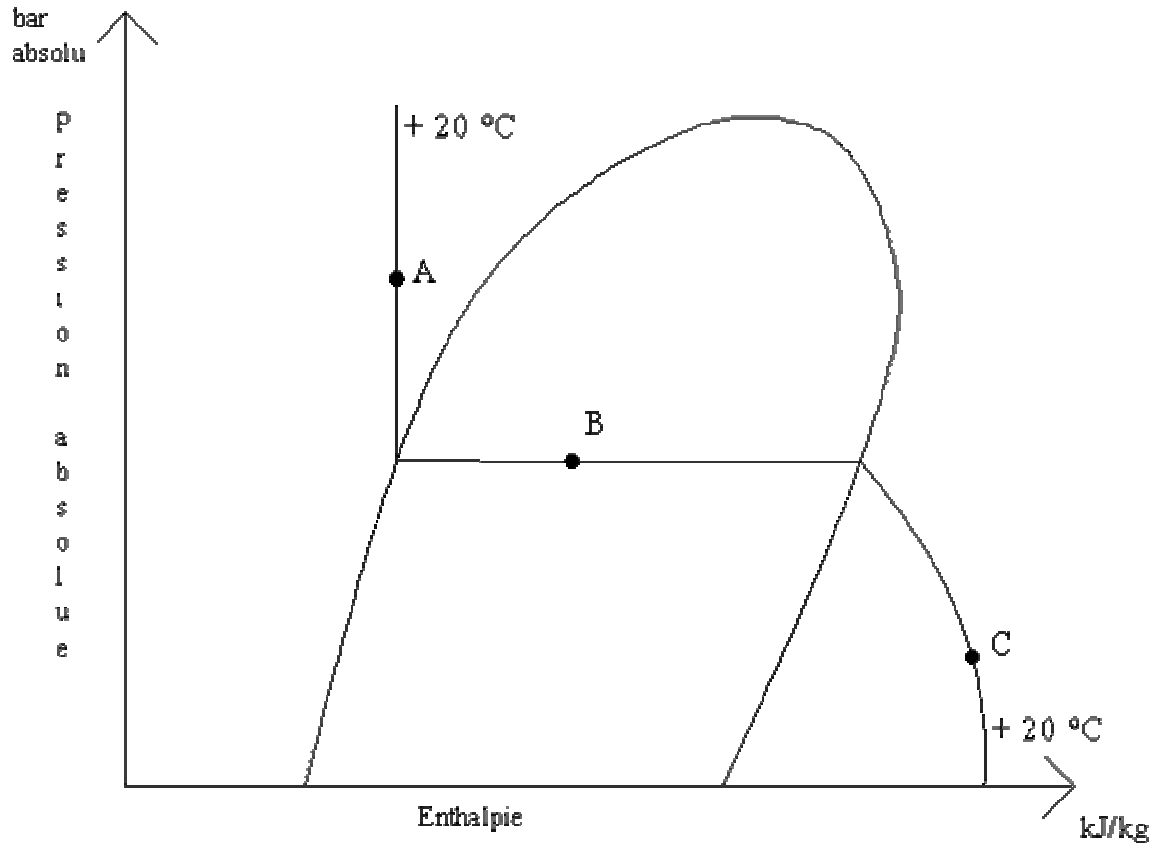
L'échelle des enthalpies évolue parallèlement à l'axe des pressions. L'enthalpie représente l'énergie totale emmagasinée par 1 kg de fluide frigorigène pour une pression et une température donnée. Une transformation qui s'effectue à enthalpie constante est une transformation ISENTHALPE.



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.

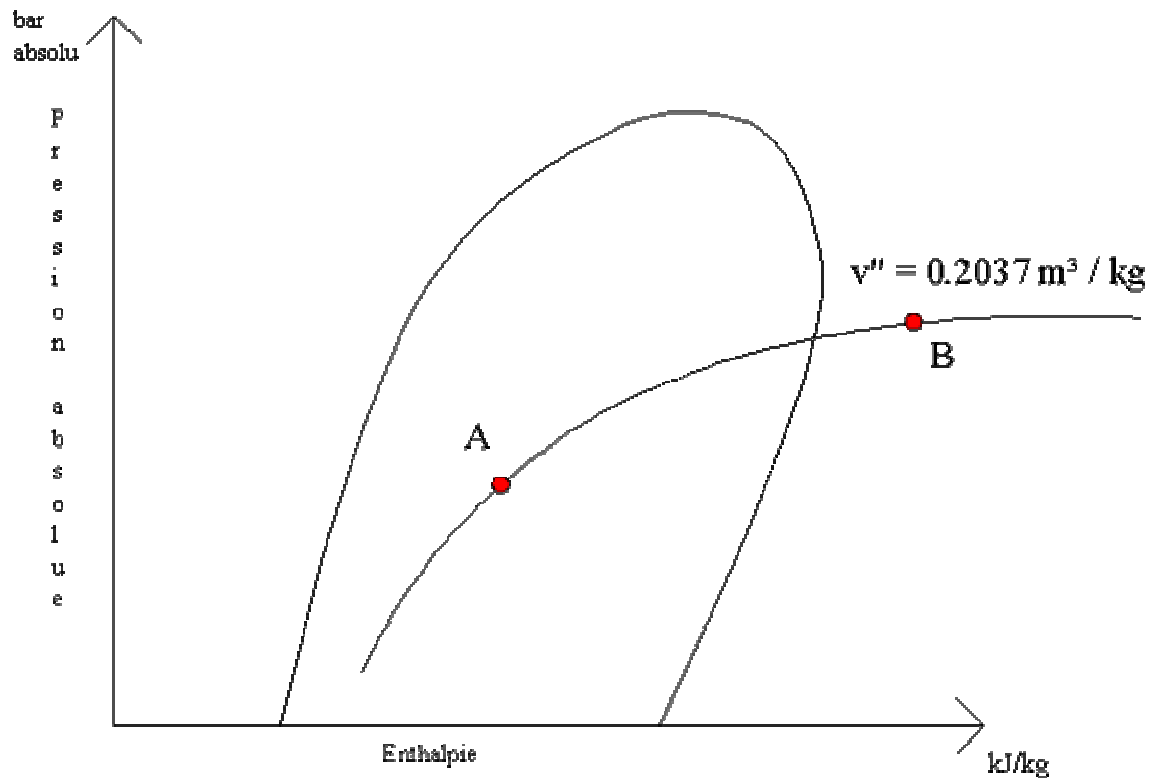


température en A = température en B = température en C = $+20\text{ °C}$

Symbole de la température : $\square$; 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.

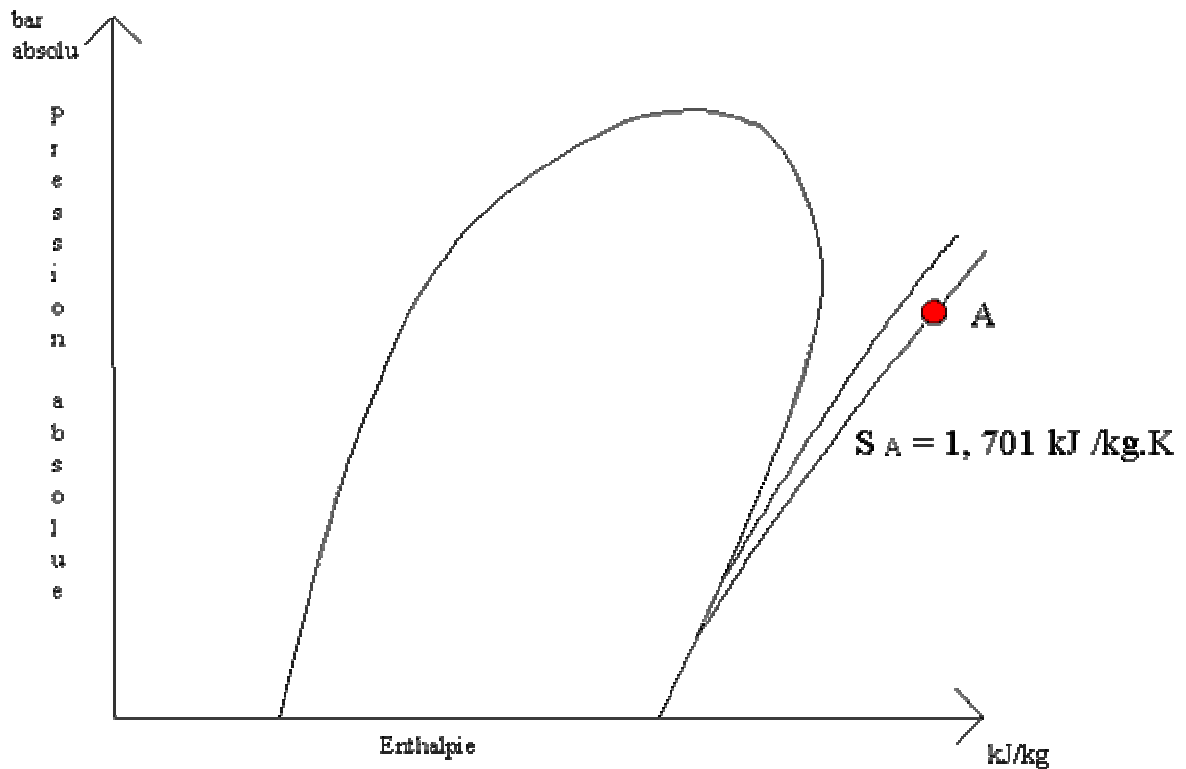


volume massique en A = volume massique en B = $0,2037 \text{ m}^3/\text{kg}$

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.

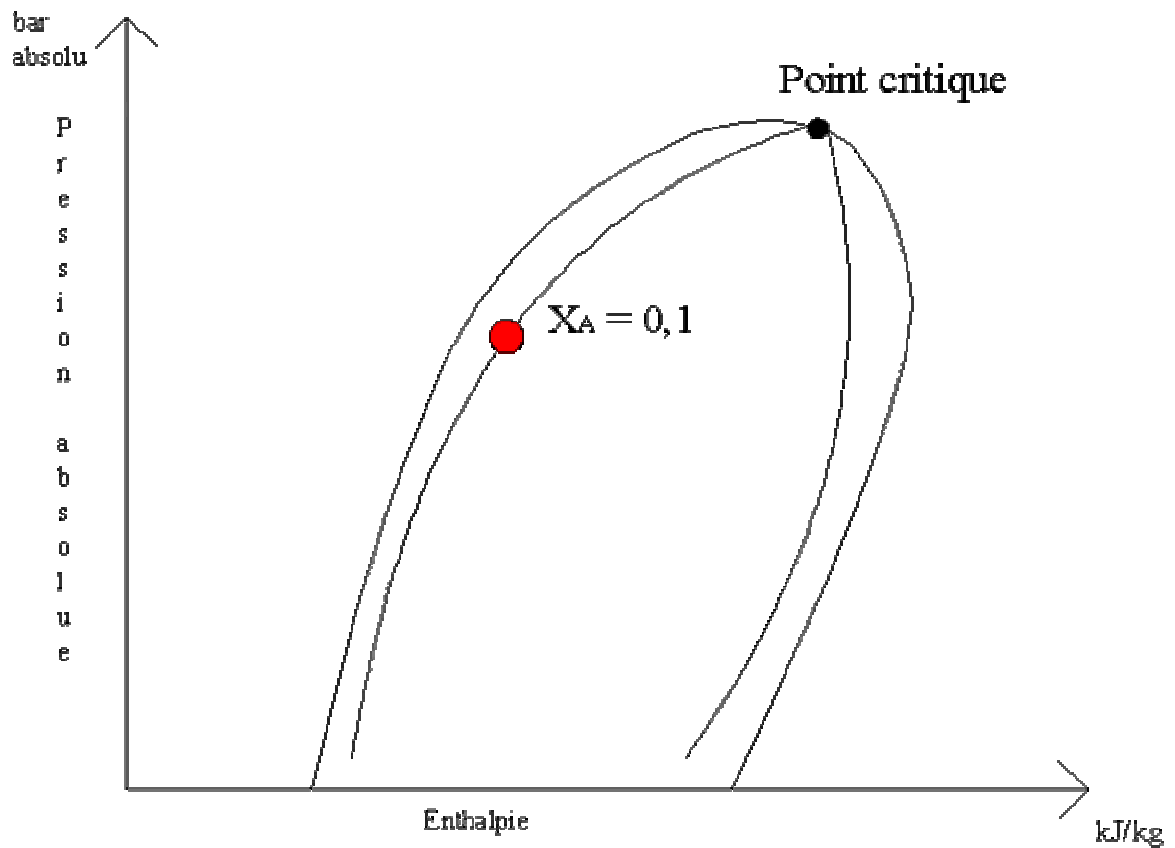


entropie en A = 1,701 kJ / kg.K

Symbole de l'entropie : s ; Unité de l'entropie : kJ / kg.K

Le titre

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



titre en A = 0,1 (10 % de vapeur et 90 % de liquide)

**Module : *GUIDE DES TRAVAUX PRATIQUES*
ETUDE THERMODYNAMIQUE DES MACHINES
*FRIGORIFIQUES***

I. TP 1 : intitulé du TP

Etude thermodynamique d'une machine frigorifique

I.1. Objectif(s) visé(s) :

Le stagiaire doit maîtriser la mesure des pressions et des températures des points de fonctionnement d'une machine frigorifique et tracer sur le diagramme enthalpique le cycle d'une machine frigorifique.

-

I.2. Durée du TP:

10heurs

I.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Equipement :

- *Banc didactique du cycle général de réfrigération.*
- *Groupe manométrique basse pression, haute pression.*
- *Thermomètre digitale avec sonde.*

I.4. Description du TP :

Etude thermodynamique des machines frigorifiques consiste à mesurer les paramètres de fonctionnement suivant le schéma ci-dessus et de tracer le diagramme enthalpique.

I.5.Déroulement du TP

Mesurer les pressions basse et haute

- *Mesurer les températures des points de fonctionnement suivant le schéma ci-dessus.*
- *Tracer sur le diagramme enthalpique le cycle frigorifique*
- *En exploitant le cycle frigorifique, faire le bilan enthalpique.*

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

Détermination de la température de condensation

La température de l'air extérieur est de + 20 °C, le $\Delta\theta$ total du condenseur est de 10 °C (donnée constructeur issue de la sélection du condenseur).

Il est impératif de choisir un condenseur avec un $\Delta\theta$ 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 + $\Delta\theta$ total du condenseur

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

Détermination de la température d'évaporation

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

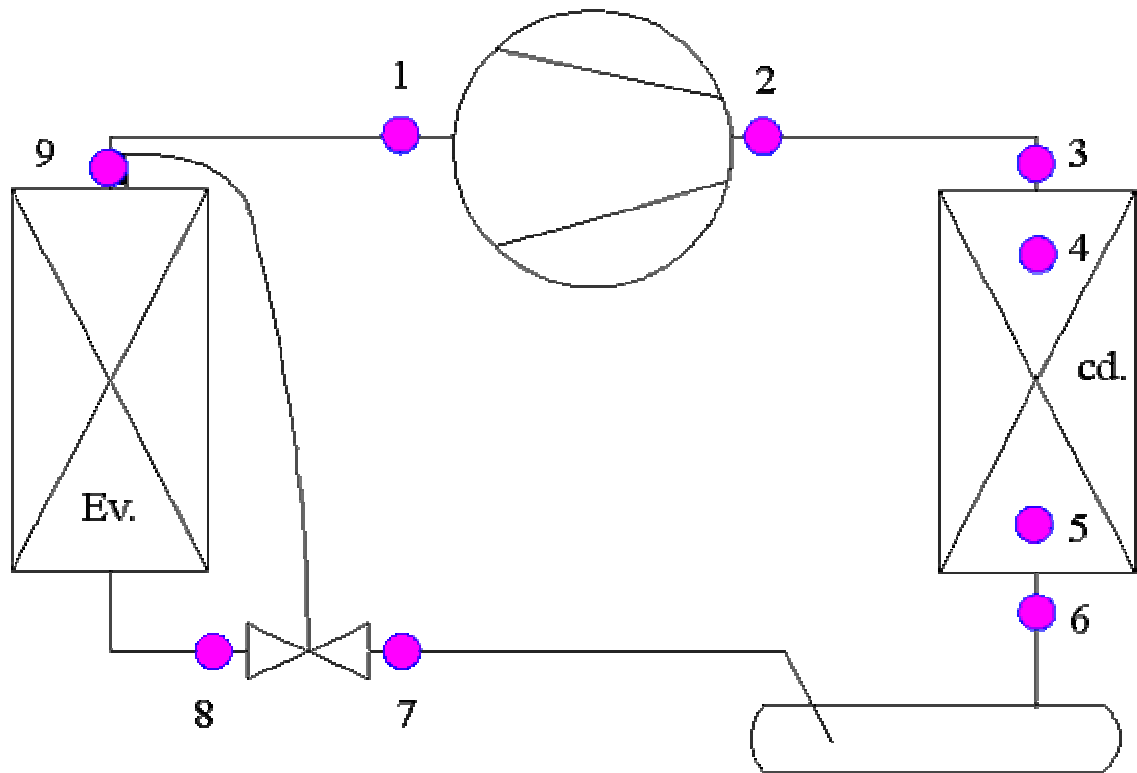
L'humidité relative de la chambre froide à maintenir est de 90 % ce qui correspond à un $\Delta\theta$ total de 5 °C. Pour la sélection de l'évaporateur, il faudra choisir ce $\Delta\theta$ total afin de maintenir la bonne humidité relative.

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

Température d'évaporation (T_o) = Température de la chambre froide - $\Delta\theta$ total à l'évaporateur

$$T_o = (- 5) - 5 = - 10 \text{ °C}$$

Schéma fluide de l'installation et points caractéristiques



La surchauffe des vapeurs à la sortie de l'évaporation

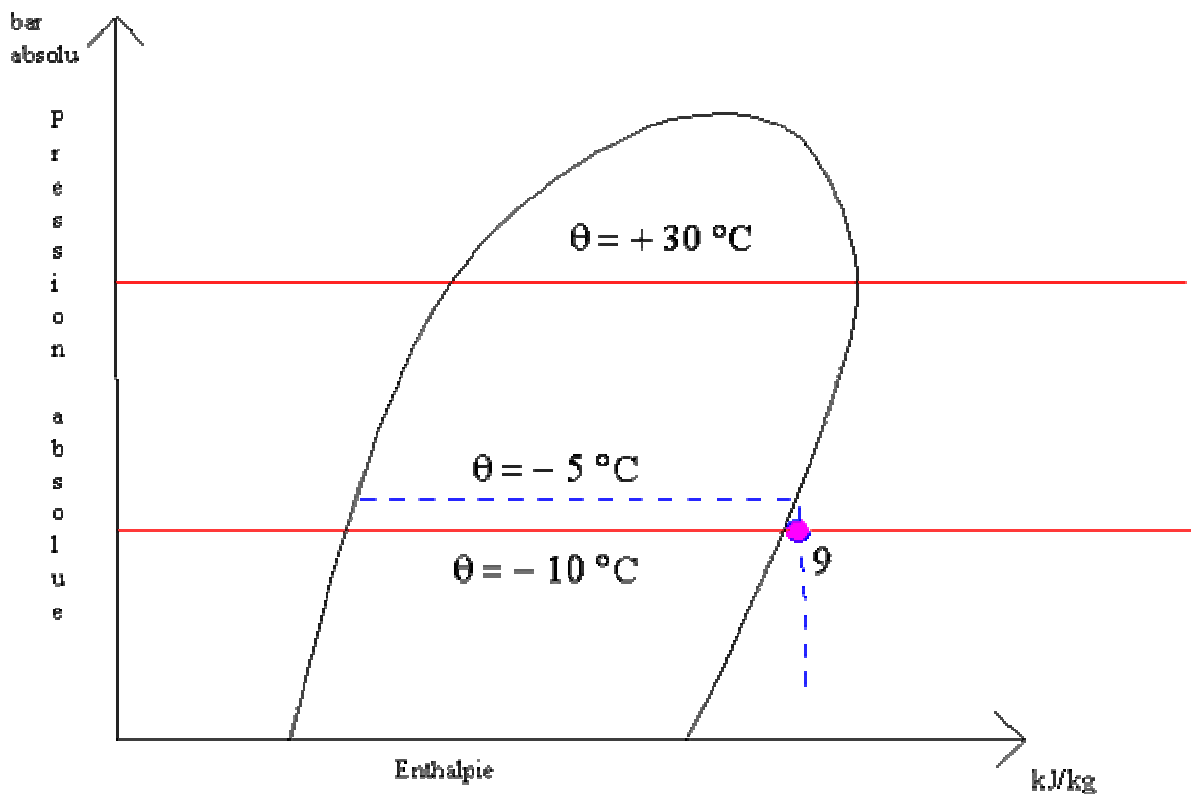
Les vapeurs saturées, en fin d'évaporation, sont surchauffées pour garantir 100 % de vapeurs à l'entrée du compresseur et éviter ainsi des coups de liquide. Cette surchauffe est assurée par le détendeur thermostatique. On l'appelle surchauffe fonctionnelle au détendeur.

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

La température au point 9 sera donc de :

$$T_9 = T_0 + 5 \text{ °C}$$

$$T_9 = (-10) + 5 = -5 \text{ °C}$$

*La surchauffe des vapeurs dans la ligne d'aspiration*

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

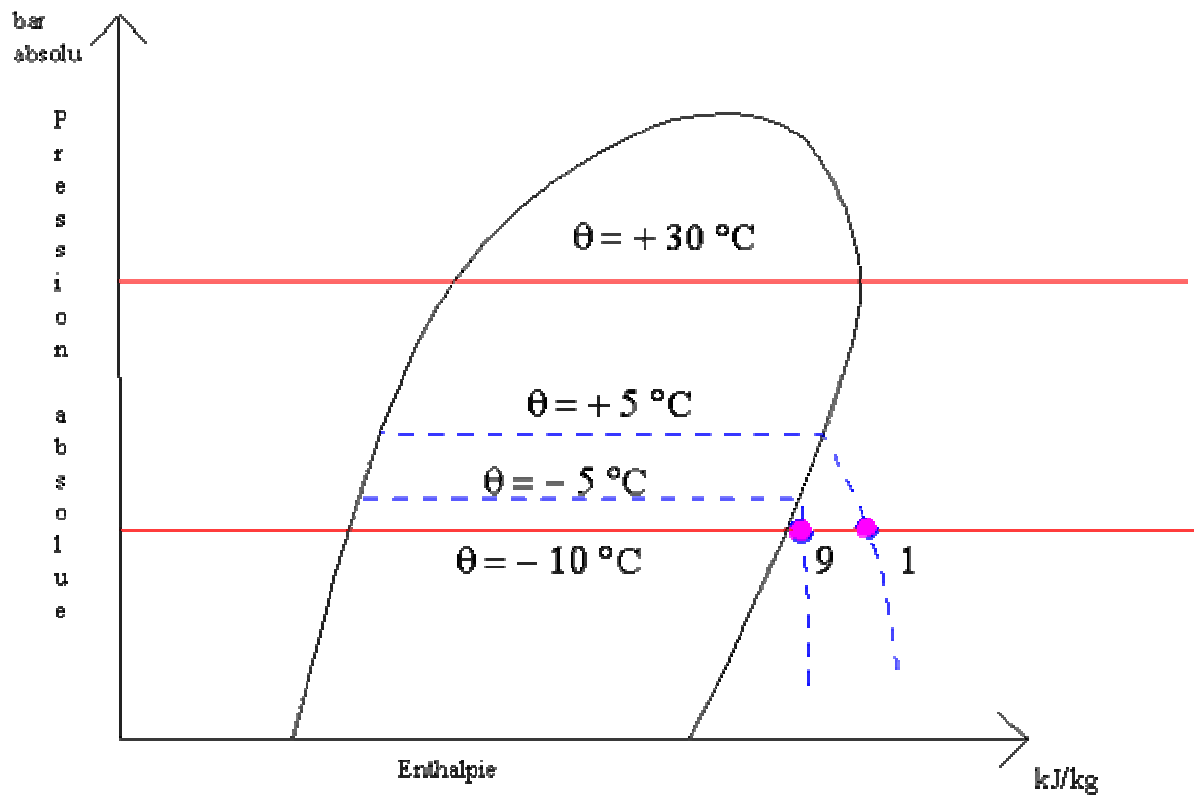
La surchauffe des vapeurs dans la ligne d'aspiration est de : 10 °C. Cette valeur correspond à une moyenne généralement relevée sur les installation dont la ligne d'aspiration est calorifugée.

La température au point 1 sera donc de :

$$T_1 = T_9 + 10 \text{ °C}$$

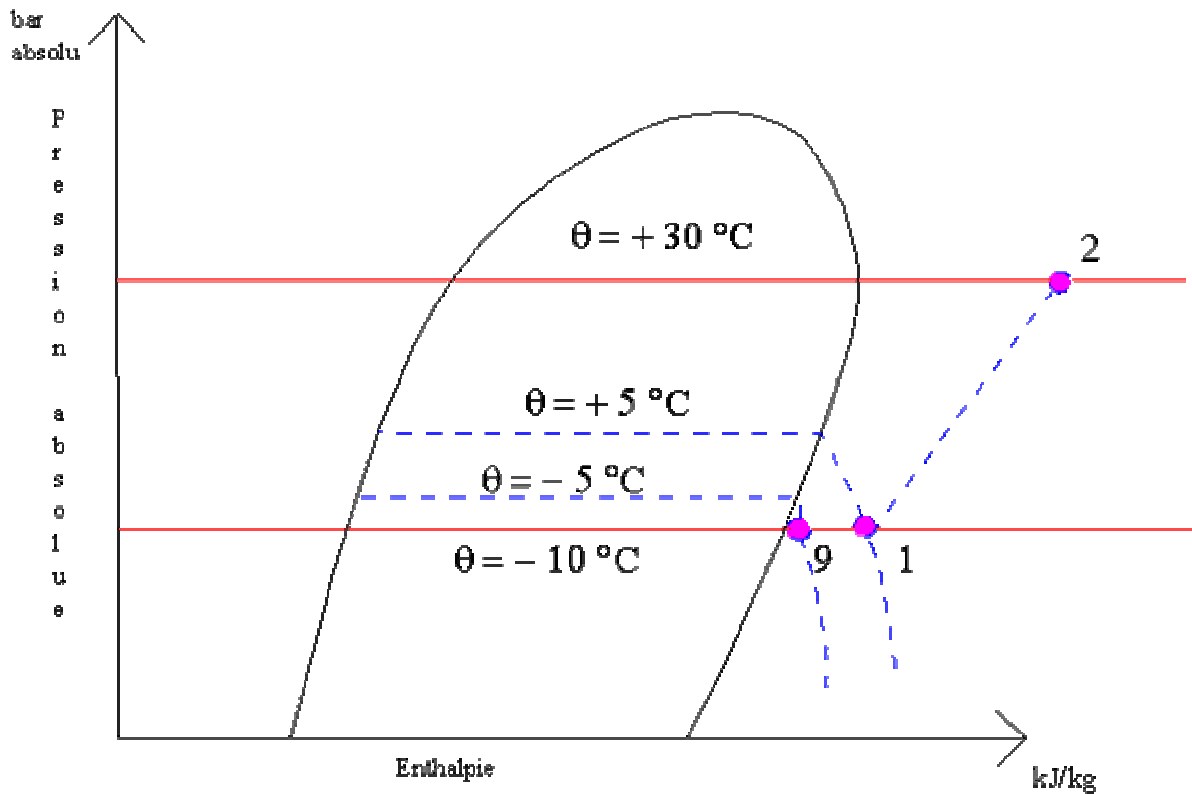
$$T_1 = (-5) + 10 = +5 \text{ °C}$$

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



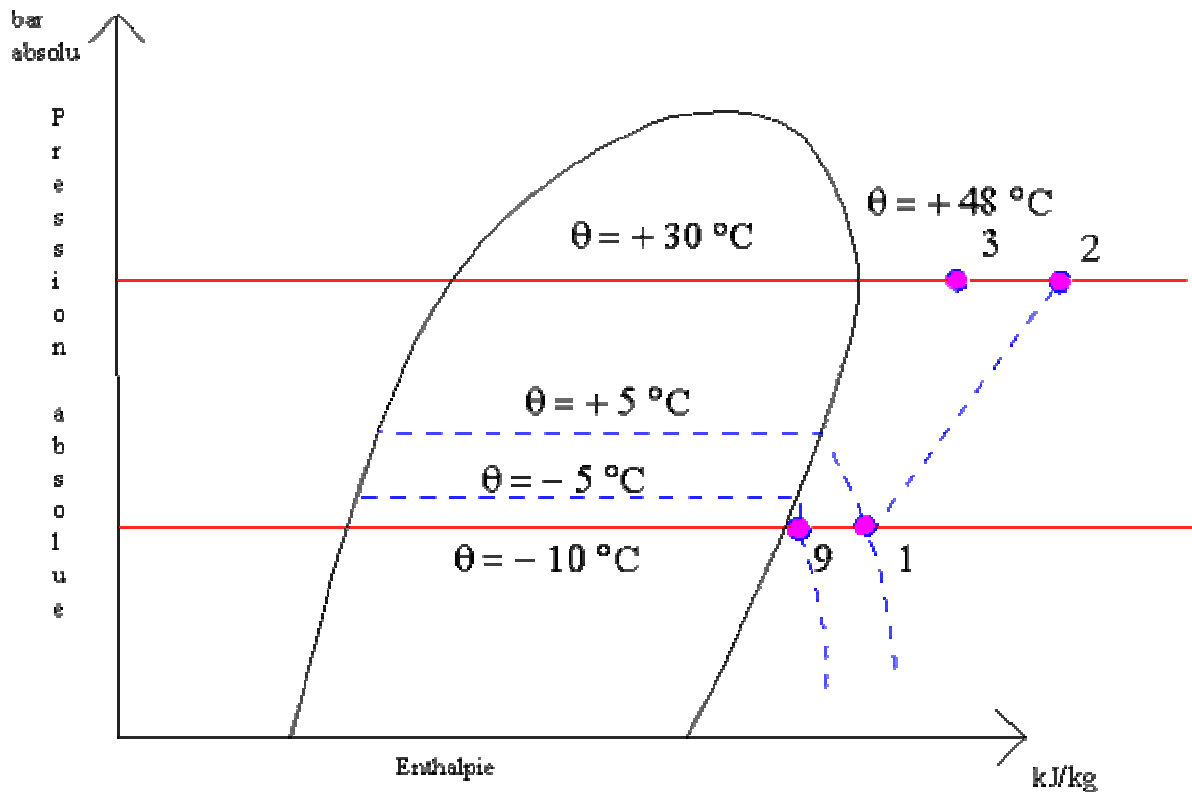
La compression

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



La désurchauffe des vapeurs dans la tuyauterie de refoulement

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



La température au point 3 est de :
 $T_3 = +48\text{ }^{\circ}\text{C}$

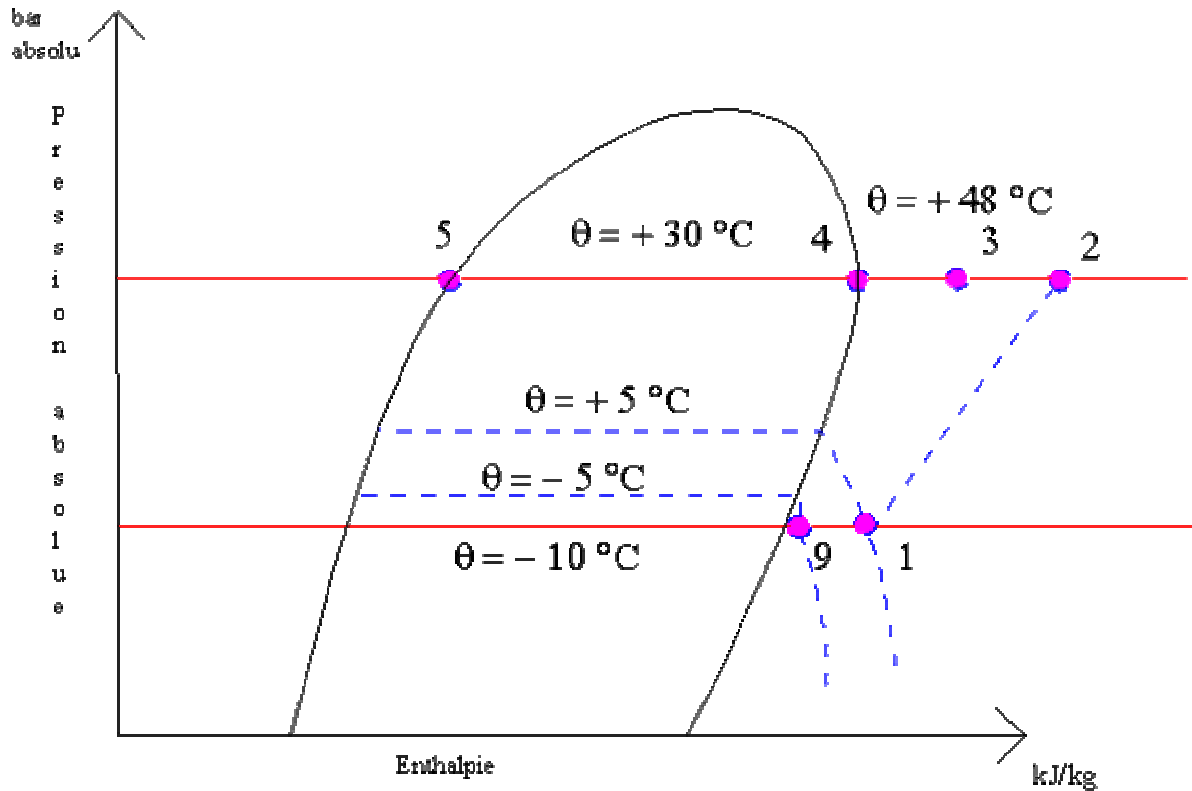
La condensation

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

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

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

$$T_4 = T_5 = + 30\text{ }^{\circ}\text{C}$$



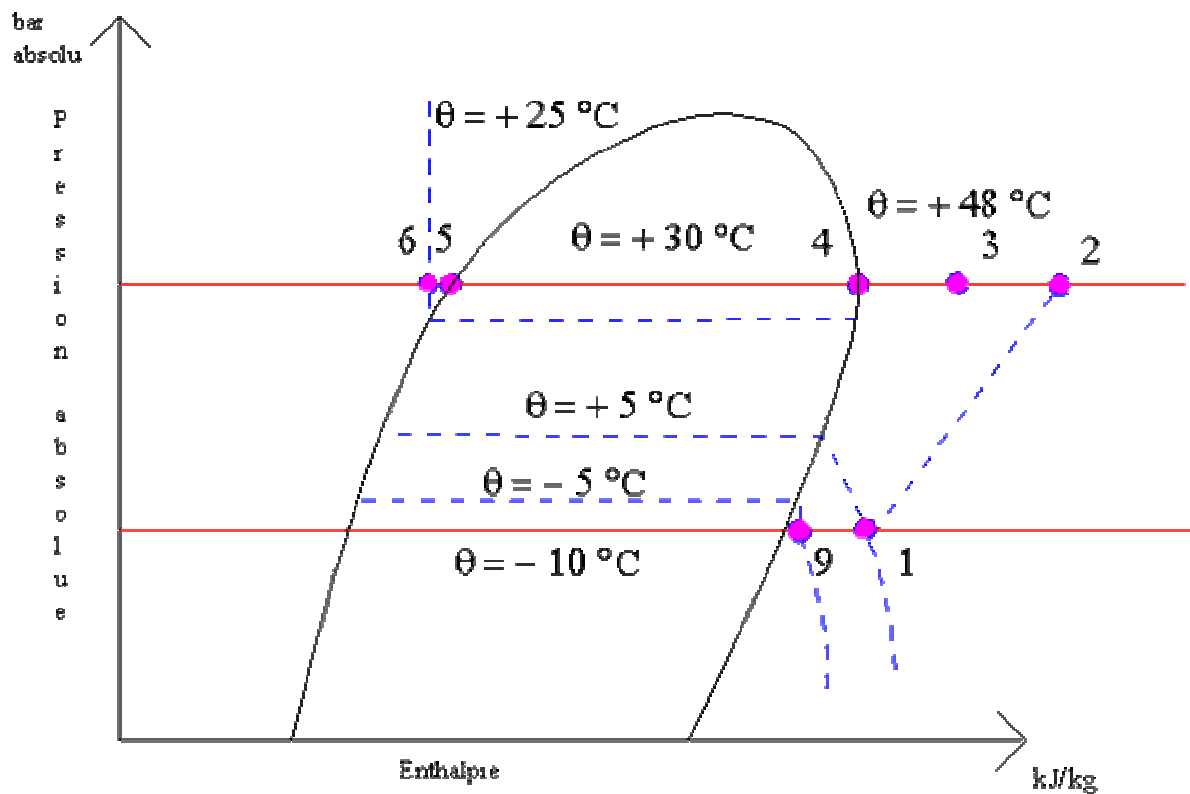
Le sous refroidissement du liquide

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

Le sous refroidissement peut être plus ou moins important et il est très utile au fonctionnement du système et permet d'alimenter le détendeur en 100% liquide. Le sous refroidissement est généralement fixé à 5 °C. Cette valeur permet en effet un fonctionnement correct pour la plus part des systèmes.

$$T_6 = T_5 - 5 \text{ °C}$$

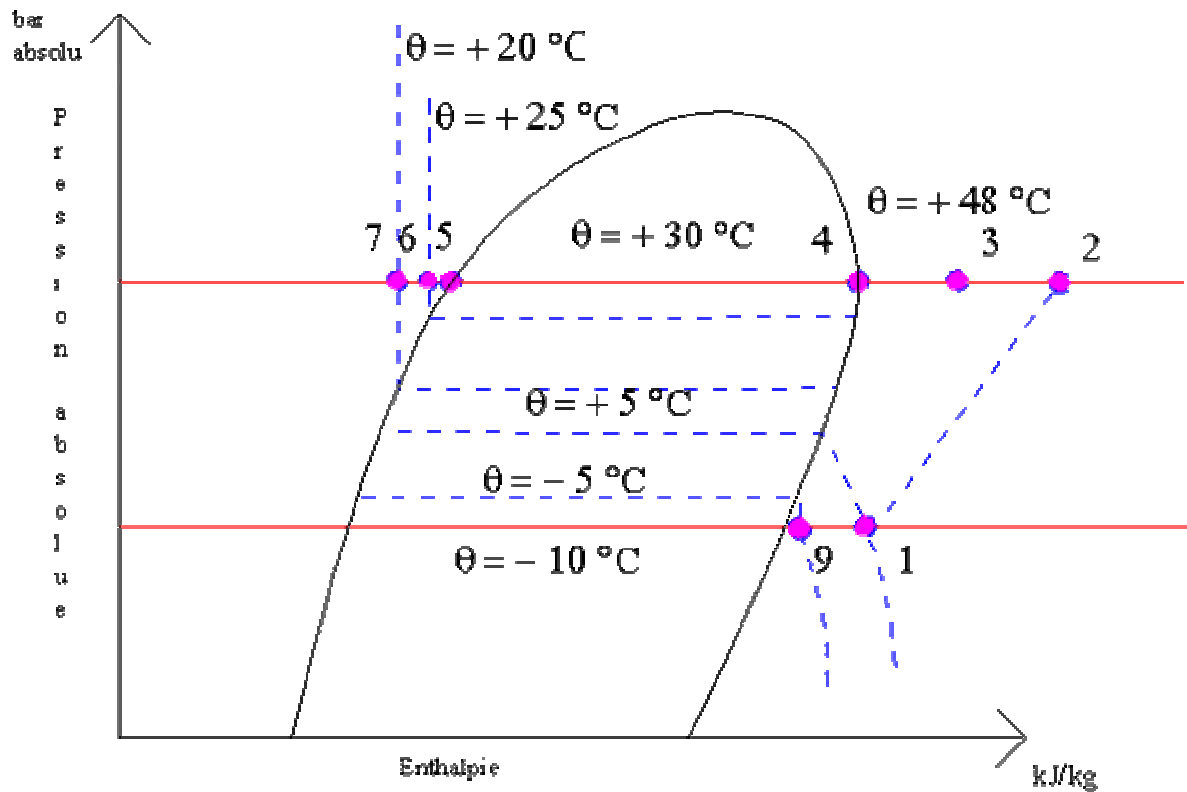
$$T_6 = (+ 30) - 5 = + 25 \text{ °C}$$



Le sous refroidissement dans la ligne liquide

Le liquide sortant du condenseur subit un refroidissement entre la sortie du condenseur et l'entrée du détendeur. La ligne liquide n'est pas calorifugée car ce sous-refroidissement est bénéfique pour le système frigorifique. le refroidissement généralement relevé est de 5 °C.

$$T_7 = T_6 - 5\text{ °C} = 20\text{ °C}$$

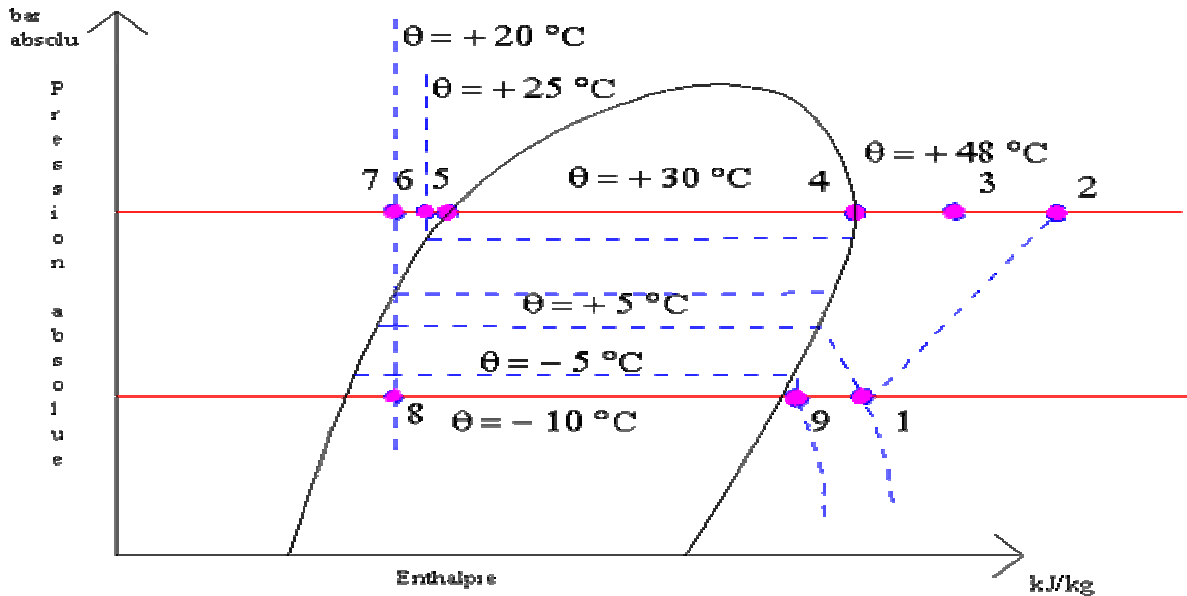


La détente

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

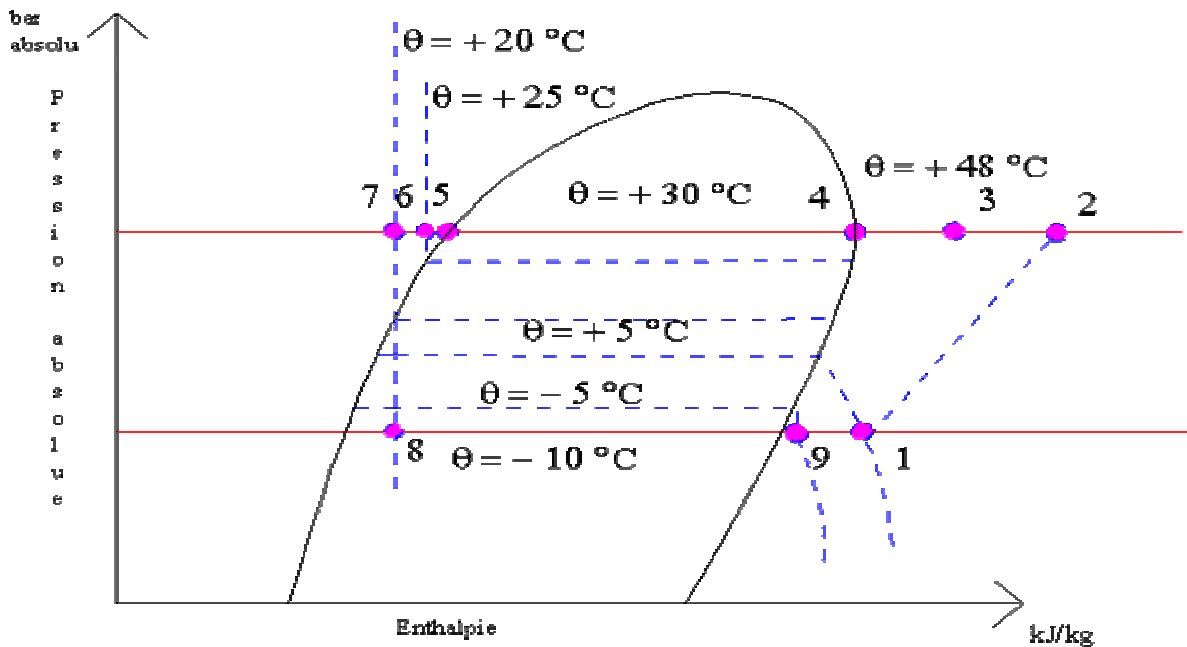
La température au point 8 est de :

$$T_8 = -10\text{ °C}$$



L'évaporation

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



Exploitation du cycle frigorifique :

Débit masse de fluide frigorigène en circulation

$$q_m = f_o / \Delta h_o$$

q_m = Débit masse de fluide frigorigène en circulation en kg / s

f_o = Puissance frigorifique en kW

Δh_o = Variation d'enthalpie entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur en kJ / kg

Volume de fluide aspiré par le compresseur

$$V_a = q_m \cdot v'' \cdot 3600$$

V_a = Volume de fluide aspiré par le compresseur en m³/ h

q_m = Débit masse de fluide frigorigène en circulation en kg / s

v'' = Volume massique en m³/ kg

Taux de compression

$$t = P_{ref.} / P_{asp.}$$

t = Taux de compression

$P_{ref.}$ = Pression de refoulement en bar absolu

$P_{asp.}$ = Pression d'aspiration en bar absolu

Dans le cas où les pertes de charge sont négligeables, la formule devient :

$$t = P_k / P_o$$

t = Taux de compression

P_k = Pression de condensation en bar absolu

P_o = Pression d'évaporation en bar absolu

Rendement volumétrique

$$h_v = 1 - 0,05t$$

h_v = Rendement volumétrique

t = Taux de compression

Volume de fluide balayé par le compresseur

$$V_b = V_a / h_v$$

V_b = Volume de fluide balayé par le compresseur en m³/ h

V_a = Volume de fluide aspiré par le compresseur en m³/ h

η_v = Rendement volumétrique

Puissance à fournir sur l'arbre du compresseur

$$P = q_m \cdot \Delta h_c / h_i \cdot h_m$$

P = Puissance à fournir sur l'arbre du compresseur en kW

q_m = Débit masse de fluide frigorigène en circulation en kg / s

Δh_c = Variation d'enthalpie entre l'entrée et la sortie du compresseur en kJ / kg

h_i = Rendement indiqué (égal au rendement volumétrique)

h_m = Rendement mécanique

Puissance utile du moteur électrique

$$P_u = P / h_{tr}$$

P_u = Puissance utile du moteur électrique en kW

P = Puissance à fournir sur l'arbre du compresseur en kW

h_{tr} = Rendement de transmission

Arbre direct 1

Manchon d'accouplement 0,95

Accouplement par courroie 0,90 à 0,70

Puissance absorbée par le moteur électrique

$$P_a = P_u / h_{el}$$

P_a = Puissance absorbée par le moteur électrique en kW

P_u = Puissance utile du moteur électrique en kW

h_{el} = Rendement électrique

Coefficient de performance frigorifique

$$\xi = f_o / P_a$$

ξ = Coefficient de performance frigorifique

f_o = Puissance frigorifique en kW

P_a = Puissance absorbée par le moteur électrique en kW

Coefficient de performance de Carnot

$$\xi_c = T_o / T_k - T_o$$

ξ_c = Coefficient de performance de Carnot

T_o = Température d'évaporation en degré K

T_k = Température de condensation en degré K

Rendement de l'installation

$$h = \xi / \xi_c$$

h = Rendement de l'installation

ξ = Coefficient de performance frigorifique

ξ_c = Coefficient de performance de Carnot

Puissance rejeté au condenseur

$$Q_K = q_m \cdot \Delta h_K$$

Q_K = Puissance rejeté au condenseur en kW

q_m = Débit masse de fluide frigorigène en circulation en kg / s

Δh_K Variation d'enthalpie entre l'entrée et la sortie du condenseur en kJ / kg

Evaluation de fin de module*Fluide frigorigène : R 134a**Température d'évaporation : - 15°C**Température de condensation : + 30°C**Surchauffe fonctionnelle : 5°C**Surchauffe dans la ligne d'aspiration : 10°C**Température du fluide à l'entrée du condenseur : + 40°C**Température du fluide à la sortie du condenseur : + 30°C**Sous refroidissement dans la ligne liquide : 5°C**Température entrée d'eau condenseur : +24°C**Température sortie d'eau condenseur : +35°C**Température entrée d'eau évaporateur : -5°C**Température sortie d'eau évaporateur : -10°C**Compression isentropique**Puissance frigorifique : 10 kW**Rendement indiqué : 0.80**Rendement mécanique : 0.85**Rendement de transmission : 0.90**Rendement électrique : 0.85***Enoncé***On vous demande de trouver les valeurs des paramètres suivants :**Débit masse de fluide frigorigène en circulation**Volume de fluide aspiré par le compresseur**Volume de fluide balayé par le compresseur**Puissance à fournir sur l'arbre du compresseur**Puissance utile du moteur électrique**Puissance absorbée par le moteur électrique**Coefficient de performance frigorifique**Coefficient de performance de Carnot**Rendement de l'installation**Puissance rejeté au condenseur***Résolution**

<i>Points</i>	<i>P bar ABS</i>	<i>T °C</i>	<i>h kJ/kg</i>	<i>v " m³/kg</i>
1	2,007	+ 5	404,45	0,1064
2	8,868	+ 54,65	437,66	
3	8,868	+ 40	421,56	
4	8,868	+ 35	248,76	
5	8,868	+ 30	241,47	
6	8,868	+25	234,32	
7	2,007	- 10	234,32	
8	2,007	- 5	395,69	
9				
10				

Le débit masse de fluide frigorigène en circulation :

$$q_m = \dot{q}_0 / \Delta h_o$$

$$q_m = 10 / (395,69 - 234,32)$$

$$q_m = 0,062 \text{ kg / s}$$

Le volume de fluide aspiré par le compresseur :

$$V_a = q_m \cdot v'' \cdot 3600$$

$$V_a = 0,062 \cdot 0,1064 \cdot 3600$$

$$V_a = 23,74 \text{ m}^3/\text{h}$$

Le volume de fluide balayé par le compresseur

$$t = P_k / P_o$$

$$t = 3,86$$

$$h_v = 1 - 0,05t$$

$$h_v = 1 - 0,05 \cdot 3,86 = 0,806$$

$$V_b = V_a / h_v$$

$$V_b = 23,74 / 0,806$$

$$V_b = 29,45 \text{ m}^3/\text{h}$$

La puissance à fournir sur l'arbre du compresseur :

$$P = q_m \cdot \Delta h_c / h_i \cdot h_m$$

$$P = 0,079 (382,00 - 356,35) / 0,80 \cdot 0,85$$

$$P = 2,98 \text{ kW}$$

La puissance utile du moteur électrique :

$$P_u = P / h_{tr}$$

$$P_u = 2,98 / 0,90$$

$$P_u = 3,31 \text{ kW}$$

La puissance absorbée par le moteur électrique :

$$P_a = P_u / h_{el}$$

$$P_a = 3,31 / 0,85$$

$$P_a = 3,89 \text{ kW}$$

Le coefficient de performance frigorifique :

$$\xi = \dot{q}_0 / P_a$$

$$\xi = 10 / 3,89$$

$$\xi = 2,56$$

Le coefficient de performance de Carnot :

$$\xi_c = T_o / T_k - T_o$$

$$\xi_c = 263 / (308 - 263)$$

$$\xi_c = 5,84$$

Le rendement de l'installation :

$$\eta = \xi / \xi_c$$

$$\eta = 2,56 / 5,84$$

$$\eta = 0,438$$

La puissance rejetée au condenseur :

$$Q_K = q_m \cdot \Delta h_k$$

$$Q_K = 0,079 \cdot (369,18 - 228,56)$$

$$Q_K = 11,11 \text{ kW}$$

Liste des références bibliographiques.

Ouvrage	Auteur	Edition
<i>Installation frigorifique tome1</i>	<i>Jean Rapin</i>	
<i>Installation frigorifique tome2</i>	<i>Jean Rapin</i>	
<i>Formulaire de froid</i>		
<i>Site web :www.la page du frigoriste</i>	<i>Philippe cretail</i>	