

---

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

---

Université TAHRI Mohamed, Béchar



Faculté de Technologie

Département de Génie-Mécanique

---

*Polycopié Pédagogique de Cours*

*Intitulé :*

**" Machines frigorifiques et pompes à chaleur "**

Code de la Matière : .....

Niveau : 3<sup>ème</sup> année Licence

Filière : .Génie-Mécanique

Spécialité : ..Énergétique

---

Les experts : M<sup>r</sup> Abdelkarim Maamar : MCA

M<sup>r</sup> Bensafi Mohamed : MCB

Etabli par l'enseignante : M<sup>me</sup> Benyamina Leila

---

Année Universitaire : .2020/2021

## Préambule

Ce cours intitulé « Machines frigorifiques et pompes à chaleur » s'adresse aux étudiants de LMD dans le cadre des Licences, génie Mécanique, mais aussi à ceux qui souhaitent acquérir les notions de base des phénomènes de froid.

Cet ouvrage est le fruit d'une longue année de travail , que j'ai le plaisir de le partager avec ceux du monde de la science et technologie.

Les phénomènes de la fabrication du froid ou bien l'extraction de la chaleur sont d'une importance capitale dans le domaine de science et technologie car ils interviennent dans de nombreux domaines industriels.

Ce cours se propose de donner une compréhension générale de ces phénomènes .

---

## Introduction

On ne peut fabriquer du froid, mais pour se faire on extrait de la chaleur,

« La chaleur ne peut passer spontanément d'un corps froid vers un corps chaud ». C'est l'énoncé de Clausius du second principe de la thermodynamique.

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

- Le système thermodynamique particulier mis en œuvre est susceptible de transférer effectivement de la chaleur d'un milieu à température inférieure où la chaleur est prélevée (source froide) vers un milieu à température supérieure où la chaleur est rejetée (puits chaud).

Lorsque le but recherché est l'extraction de chaleur à un corps, ou à un milieu, pour le refroidir ou le maintenir à une température inférieure à celle de l'ambiance, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de produire du froid, le système thermodynamique qui effectue cette opération prend naturellement le nom de machine frigorifique. L'effet utile est la chaleur extraite (ou le froid produit) à la source froide

Si, au contraire, le but recherché est la production de chaleur pour chauffer un milieu ou le maintenir à une température suffisamment haute à partir de chaleur gratuite récupérée à une température plus basse, le système en question est dénommé habituellement pompe à chaleur. L'effet utile est alors la chaleur rejetée au puits chaud. Notons que les « hautes températures » que produisent les pompes à chaleur sont généralement très inférieures à celles que l'on obtient aisément en mettant en œuvre d'autres techniques, la combustion par exemple.

Dans certains cas spécifiques, on peut utiliser à la fois le froid produit à la source froide et la chaleur rejetée au puits chaud. Un tel système est alors généralement appelé thermofrigopompe.

---

# TABLE DES MATIÈRES

---

## Introduction

## Chapitre I : Généralités

I.1 Historique du froid :.....	01
I.2 Le cycle frigorifique de Carnot_ .....	03
I.2.1 Description du cycle .....	05
I.2.2 Efficacité d'un cycle de Carnot moteur - Moteur ditherme.....	06
a/ Efficacité (frigorifique) du cycle de Carnot d'une machine frigorifique.....	08
b/ Efficacité (thermique) du cycle de Carnot d'une pompe à chaleur.....	09
I.2.3 - Echanges de travail et chaleur dans une machine de Carnot.....	09
a/ Machine de Carnot où le système est un gaz parfait.....	09
b/ Machine de Carnot quelconque.....	09
I.2.4 - Performance d'une machine de Carnot.....	09
a/ Rendement d'un moteur de Carnot.....	10
b/ Coefficient de performance frigorifique d'une machine de Carnot.....	10
c/ Coefficient de performance thermique d'une machine de Carnot.....	10
I.2.5 Théorème De Carnot.....	10
I.3 Le coefficient de performance du cycle de Carnot.....	12

## Chapitre II Cycle thermodynamique d'une machine frigorifique à compression de vapeur

II.1 Représentation du cycle thermodynamique de base (sur un diagramme T-s et P-h) .....	13
II 1.1 Le Diagramme entropique (T, S).....	13
II.1.2 Cycle de réfrigération dans le diagramme (T, S).....	14
II 1.3 Le Diagramme enthalpique (P.h).....	15
<b>II.1.3.1 Description du cycle.....</b>	<b>16</b>
II.2 Représentation du cycle thermodynamique pratique (sur un diagramme T-s et P-h) ...	19
II.2.1 Écarts par rapport au cycle idéal.....	20

II 3. Bilan thermique du cycle thermodynamique .....	21
a/ Bilan du détenteur .....	21
b/ Bilan de l'évaporateur .....	22
c/ Bilan du compresseur.....	22
d/ Bilan du condenseur .....	23
II.4 : Notion de fluide frigorigène.....	26
II.4.1 : définition de fluide frigorigène .....	26
II.4.2 : Classification des fluides frigorigènes.....	27
a/ La famille des fluides inorganiques purs.....	27
b/ La famille des fluides hydrocarbures.....	27
c/ La famille des fluides hydrocarbures halogénés.....	29
d/ La famille des autres fluides.....	29
II.4.3 : Les séries de fluides frigorigènes.....	30
a/ Série R – 400.....	30
b/ Série R – 500.....	30
c/ Série R – 600.....	31
d/ Série R – 700.....	31
II.4.4 : Classification de fluides frigorigènes en groupes de sécurité.....	35
a/ Classement de la toxicité des fluides.....	35
b/ classement de l'inflammabilité des fluides.....	35
II.5 Etude des performances (COP, .....)	36
a/ Définition du COP.....	37
b/ les équations du COP en mode chaud et froid .....	39
II.6 Application industrielle du froid.....	42
a/ Le Froid Industriel.....	46
b/ le froid commercial.....	47

### **Chapitre III. Composants d'une machine frigorifique à compression de vapeur**

III Composants d'une machine frigorifique à compression de vapeur.....	49
III.1 Le compresseur.....	50
III. 2 L'évaporateur.....	52
III. 3 Le condenseur .....	54
III. 4 Le détendeur.....	55
III.5 Fonctionnement complet.....	56
III.6 Le fonctionnement de la machine frigorifique en équilibre permanent.....	56
III .7 Les types des éléments de base du circuit frigorifique.....	57
III .7.1 Les différents types du compresseur .....	58
III.7.1.1 Compresseur à piston.....	59
III.7.1.2 Compresseur à spirale (Scroll).....	59
III.7.1.3 Compresseur à vis (Screw) .....	60
III.7.1.4 Compresseurs centrifuge.....	60
III.7.2 Les différents types d'évaporateur .....	60
III.7.2.1. Evaporateur à convection naturelle.....	60
III.7.2.2 Evaporateur convection forcée .....	61
III 7.3 Les différents types de condenseur .....	61
III 7.3.1 Condenseur à convection naturelle .....	61
III.7.3.2 Condenseur à convection forcée .....	61
III.7.4 Les différents types de détendeurs .....	61
III 7.4.1 Détendeur capillaire .....	61
III.7.4.2 Les détendeurs thermostatiques.....	61
III7.4.3. Les dé tendeurs électroniques.....	61

### **Chapitre IV . Autre types de machines frigorifiques**

IV . Autre types de machines frigorifiques.....	62
---	----

IV 4.1 La machine frigorifique à absorption .....	64
IV 4.2 Le principe de fonctionnement d'une machine à absorption.....	65
IV 4.2 Cycle frigorifique à air.....	69
IV 4.2.1 Cycle de Joule inversé.....	72
IV 4.2.2 Cycle de Joule inverse à récupération (échangeur de chaleur....	73

## **Chapitre V Cycle thermodynamique d'une Pompe à Chaleur**

V. 1 schéma fluidique d'une pompe à chaleur	
V.1.1 Le cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur.....	73
V.1.2 Le schéma fluidique d'une pompe à chaleur.....	74
V.1.3 Des schémas fluidiques détaillés d'une pompe à chaleur.....	74
V. 2 Vanne d'inversion du cycle.....	75
V.2.1 définition de la vanne.....	75
V.2.2 les composants de la vanne.....	77
V.2.3 Le circuit détaillé de la vanne.....	77
V 3 Etude des performances (saison été et saison hiver).....	81
V3.1 Détermination des performances.....	81
V 3.1.1 En chauffage (saison hiver).....	81
V 3.1.2 En rafraîchissement ou climatisation (saison été).....	84
V3.1.3 Les différents coefficients de performance des pompes à chaleur... 84	
V 3.1.3.1 Le COP du groupe moto-compresseur.....	84
V 3.1.3.2 Le COP global de la PAC.....	85
V 3.1.3.3 Le COP global de l'installation.....	86
V 3.1.3.4 Le COP saisonnier ou global annuel de l'installation.....	86
V 3.1.3.5 Le facteur de performance saisonnier SPF.....	87
V.4 Les différents types de pompes à chaleur .....	88
V.4.1 Définition et généralités d'une pompe à chaleur (PAC).....	88
V.4.1.1 Fonctionnement de la PAC .....	90

V. 4.2 Les types de Pompes à chaleur.....	90
V.4.2.1 Les PAC géothermiques.....	90
V.4.2.2 Les PAC Aquathermiques.....	94
V.4.2.3 Les PAC Aérothermiques.....	94
V4.3 Mesure de la performance d'une PAC.....	94
V.4.4 Autres types de PAC .....	95
V4.4.1 La PAC "haute température ".....	96
a/ Principe de la compression biétagée.....	97
b/ Principe de l'injection.....	97
c/ Principe du montage en cascade.....	98
V4.4.2 La "pompe à chaleur hybride".....	99
V4.4.3 PAC hybride avec son groupe extérieur.....	100
V4.4.4 La pompe à chaleur avec moteur à combustion.....	100
V4.4.4 La pompe à chaleur gaz à absorption.....	101
V 4.4.5 La pompe à chaleur gaz à adsorption.....	102

## **Conclusion**

## **Références bibliographiques**

# Chapitre 1. Généralités

## I.1 Historique du froid

Le froid, qu'est-ce que le froid ? , comment est – il survenu ? .

Le froid est la sensation contraire du chaud, associée aux températures basses, il abaisse la température des denrées et de ce fait ralentit les évolutions physiologiques, biochimiques et microscopiques.

On pourra dire que le froid doit à la chaleur , ce que l'obscurité doit à la lumière , historiquement on parle beaucoup plus de la découverte du feu par l'homme , en évoquant peu celle du froid , car si on peut dire sa découverte est survenue après celle de la chaleur.

Jadis l'homme s'est demandé comment conserver ses aliments, Il s'est rendu compte que pendant l'hiver ses aliments se conservaient plus longtemps qu'en été. C'est ainsi qu'il a compris que le froid permettait de ralentir l'état de dégradation des aliments.

Dans les pays où le froid atteignait des températures négatives, on creusait pour enfouir les aliments dans la neige. On creusait également pour conserver la glace le plus longtemps possible.

Au moyen âge, on conservait les aliments dans les caves des habitats.

Avant le milieu du XIXe siècle, l'utilisation humaine du froid se fait par l'exploitation de la glace naturelle.

Dès l'Antiquité, la glace et la neige étaient utilisées parfois pour conserver des viandes autrement que par la salaison, le fumage ou la saumure, mais aussi pour déguster des mets glacés. Le procédé de salaison consiste simplement à faire infuser le sel dans les aliments afin d'apporter certains changements physiques et chimiques qui ont pour effet de stabiliser la chair, que ce soit de la viande ou du poisson, et d'éviter le développement des bactéries.

Au XVIe siècle, le commerce de la glace prend un grand essor. Un peu pour la conservation momentanée de certains produits alimentaires mais surtout pour la dégustation de glaces et sorbets parfumés. Dégustation réservée aux plus riches, car la glace était un produit de luxe.

La glace des étangs et des cours d'eau était collectée pendant l'hiver et entreposée dans des endroits spécialement conçus appelés glacières, Elle est hermétiquement fermée et relativement bien protégée des variations thermiques. On y vient avec précaution prélever ce dont nous avons besoin.

La glace des glaciers a été également, longtemps exploitée comme matière première. Après l'arrivée des chemins de fer, l'industrie de la glace s'est développée pour approvisionner une bonne partie de l'Europe.

A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'invention de machines pour la production artificielle de la glace provoquera la faillite de cette activité industrielle et la fin de l'exploitation de la glace naturelle.

Pour produire de la glace, il faut obtenir du froid. Mais on ne fabrique pas vraiment du froid : en fait, on retire de la chaleur. Ainsi, le principe d'une machine de réfrigération est de prendre de la chaleur à l'endroit où l'on veut créer du froid, de transporter cette chaleur à l'extérieur et de la rejeter.

### L'historique de l'invention de la machine thermique :

En 1756, William Cullen donna la première démonstration publique d'un processus artificiel de refroidissement. Cullen utilisait une pompe afin de créer un vide dans un contenant rempli d'éther en chimie : les **éthers** sont une famille de composés organiques ;

- **l'éther diéthylique** (appelé parfois « éther » tout court), est une substance employée comme solvant ;
- **l'éther de pétrole** est la fraction la plus volatile du pétrole.

En retirant de la chaleur de son environnement, l'éther commença à bouillir. Cela mena à la formation d'une petite quantité de glace. Mais ce processus ne connut pas d'application commerciale. Pas à pas, la technique de refroidissement évolua mais il est resté longtemps au niveau des expérimentations individuelles.

C'est seulement en 1869 que Charles Tellier développa la première installation pouvant servir à conserver les aliments. Vers les années 1920, une machine à absorber le froid est inventée en Suède. Cela est une grande avancée technologique. En 1922, un modèle (composé d'une boîte en bois, d'un compresseur refroidi à l'eau et d'une feuille pour conserver la glace) est lancé sur le marché. Le frigo est vendu pour la somme vertigineuse de 714 dollars. Par comparaison, une Ford Model T coûtait à ce moment-là 450 dollars.

Le premier réfrigérateur qui fut largement répandu était le « Monitor-Top », développé par General Electric. Environ un million d'exemplaires ont été produits, surtout pour les besoins de l'industrie. Il faut tout de même attendre la fin de la Seconde Guerre Mondiale avant de voir une production de masse de frigo pour les particuliers ; cela grâce à l'introduction de fréon comme gaz de refroidissement.

Donc , en conclusion nous disons qu'on peut créer **le froid** artificiellement en effectuant le vide dans une chambre ou par des **systèmes réfrigérants** tels que les réfrigérateurs ou les congélateurs qui sont deux types fondamentaux de traitement par le froid des denrées alimentaire.

- **Le froid positif** : la réfrigération
- **Le froid négatif** : la congélation

### **La réfrigération :**

**Le traitement par le froid "réfrigération"** consiste à refroidir, puis à conserver une denrée à température positive (à 0°C) de telle façon que l'eau contenue dans cette denrée, ne puisse être transformée en glaces.

### **La congélation :**

**Le traitement par le froid "congélation"** consiste à refroidir, à congeler, et à conserver une denrée à une température très inférieure à celle de l'eau, constitutive en son sein. Une grande partie de cette eau est transformée en glace sous de cristaux plus ou moins gros. Les températures usuelles de conservation par congélation sont comprises entre -10°C et -35°C.

Historiquement, c'est avec l'invention des machines thermiques que la thermodynamique est née en tant que science. Les notions de température d'énergie, de travail et de chaleur ont été introduites pour modéliser le fonctionnement des machines à vapeur et améliorer leur rendement. Toutes les machines thermiques sont basées sur le même principe que la machine à vapeur.

En conclusion : Pour acquérir une température ambiante inférieure à celle extérieure; il est nécessaire de prévoir une installation frigorifique dont la puissance soit correctement déterminée et les composantes parfaitement sélectionnées, vue sa nécessité dans le domaine du froid industriel.

Il existe différentes façons d'obtenir du froid. Le principe réside toujours en un transfert de chaleur (calories), à partir du système à refroidir vers l'environnement. La technologie la plus employée dans la grande majorité des réfrigérateurs électroménagers et dans de nombreuses applications industrielles est la réfrigération à compression de vapeur.

## **I.2 : Le cycle frigorifique de Carnot**

Le **cycle de Carnot** est un cycle thermodynamique théorique pour un moteur ditherme, constitué de quatre processus réversibles : une détente isotherme réversible, une détente adiabatique réversible (donc isentropique), une compression isotherme réversible, et une compression adiabatique réversible.

C'est le cycle décrit par une machine ditherme, constitué de deux portions d'isothermes lorsque la machine est en contact avec les sources, et de deux portions d'adiabatiques lorsque la machine passe d'une source à l'autre.

Il est réversible si les isothermes et adiabatiques sont elles-mêmes réversibles.

Les différentes classes de machines thermiques par flux de chaleur : (D)

a/ machines monothermes (une seule source) : n'existe pas (car pas de flux)

b/ machines dithermes (deux sources de chaleur) : le plus courant

c/ machines trithermes (trois sources de chaleur) : rare

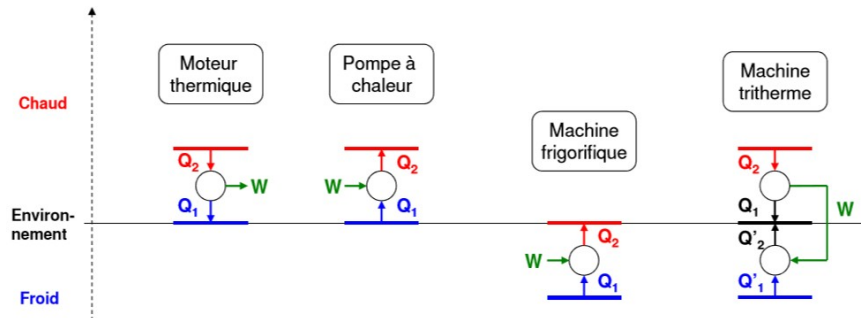


Fig 1.1 Vue générale des machines thermiques [4]

On peut représenter le cycle réversible dans le diagramme de Clapeyron et le diagramme entropique :

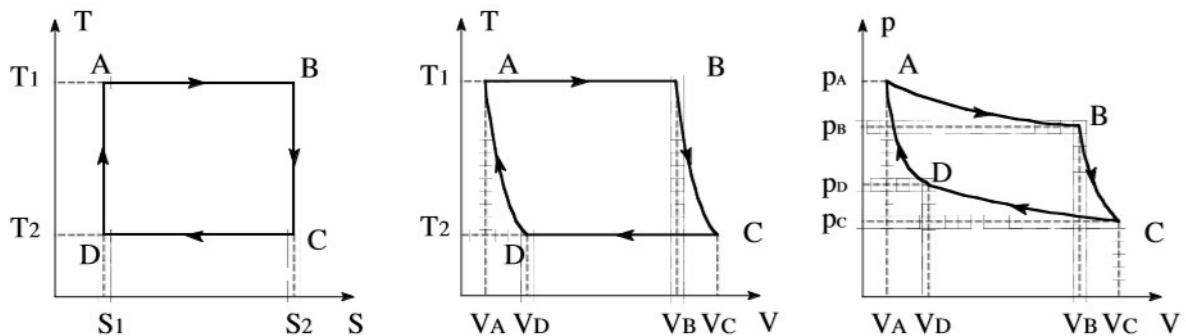


Fig 1.2 Le cycle de Carnot dans les diagrammes de Clapeyron et entropique [5]

Dans le sens des aiguilles d'une montre, on a le cycle est moteur :

$$W = - \int_C^A p dV < 0 \Rightarrow Q > 0 \quad (1)$$

Dans le sens trigonométrique, on a le cycle est résistant :

$$Q = \int_C^A T ds < 0 \Rightarrow Q < 0 \quad (2)$$

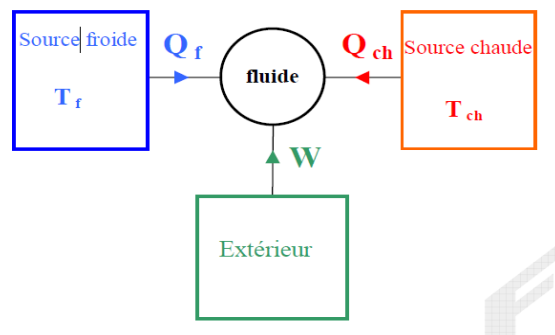
Quand il est moteur, c'est le cycle le plus efficace pour obtenir du travail à partir de deux sources de chaleur de températures constantes, considérées comme des thermostats. C'est un cycle moteur, donc parcouru dans le sens anti-trigonométrique dans un diagramme de Clapeyron. Le cycle inverse (parcouru dans le sens

trigonométrique) est le moyen le plus efficace de transférer de la chaleur d'une source froide à une source chaude à partir d'une source de travail.

L'efficacité des autres cycles et des machines réelles est comparée à celle du cycle de Carnot par le biais du rendement, un nombre sans dimension compris entre 0 (efficacité nulle) et 1 (efficacité parfaite).

Les chaleurs et les travaux sont reçus par le fluide qui décrit un cycle réversible constitué par deux isothermes et deux adiabatiques.

Le fluide c'est le système thermodynamique étudié, l'échange de chaleur de façon isotherme et du travail s'effectue selon le schéma de principe qui suit :



Dans ces deux diagrammes les cycles sont parcourus dans le même sens, le sens horaire.

### 1.2.1 Description du cycle

Carnot cherchait à faire un cycle avec la meilleure efficacité possible. Ainsi l'efficacité de toute machine thermodynamique peut être comparée avec l'efficacité du cycle de Carnot. C'est un cycle théorique : en effet, le cycle étant réversible, il s'effectue en l'absence de phénomènes dissipatifs, et n'est donc pas un cycle réel.

Le cycle est composé de quatre transformations successives : (sur les figures respectivement).

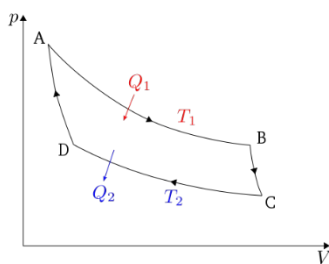


diagramme de Clapeyron

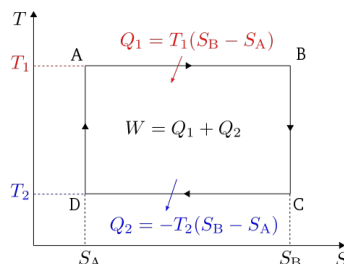


Fig 1.4 Cycle de Carnot dans un diagramme température-entropie.

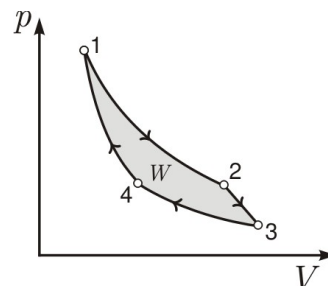


Fig1.5 Cycle de Carnot moteur d'un gaz parfait dans le diagramme de Clapeyron.

- 1 Compression isotherme réversible (C→D) / (3→4)
- 2 Compression adiabatique réversible (D→A) / (4→1)
- 3 Détente isotherme réversible (A→B) / (1→2)
- 4 Détente adiabatique réversible (B→C) / (2→3)

Le deuxième principe de la thermodynamique permet d'établir pour une transformation réversible (car le fluide est à la température de la source) l'égalité de Clausius-Carnot :

$$\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \quad (3)$$

avec :

- $Q_f$  : Transfert thermique avec la source froide (compté négativement).
- $Q_v$  : Transfert thermique avec la source chaude (compté positivement).
- $T_f$  : Température de la source froide, constante (en kelvins).
- $T_v$  : Température de la source chaude, constante (en kelvins).

Cycle de Carnot moteur d'un gaz parfait dans le diagramme de Clapeyron :

- 1-2 : **isotherme** réversible ;
- 2-3 : **adiabatique** réversible ;
- 3-4 : **isotherme** réversible ;
- 4-1 : **adiabatique** réversible.

$W$  est le travail total reçu par le système au cours d'un cycle et est représenté géométriquement par l'aire du cycle.

## I.2.2 Efficacité d'un cycle de Carnot moteur - Moteur ditherme

Imaginons un moteur thermique ( $W < 0$ ) fonctionnant entre deux sources de chaleur (de températures respectives  $T_1$  et  $T_2 (> T_1)$ ) et décrivant le cycle  $A B C D$  correspondant aux quatre transformations *réversibles* suivantes :

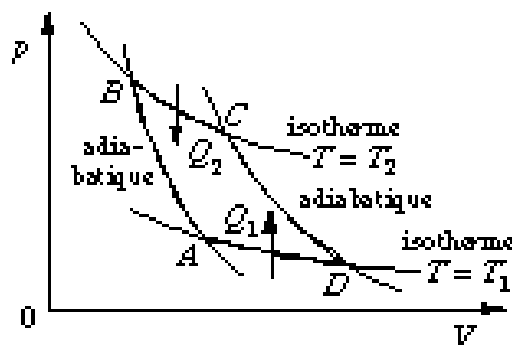


Fig 1.6 diagramme de Clapeyron pour un gaz

- $A \rightarrow B$  : *adiabatique* amenant le système de  $T_1$  à  $T_2$  ;
- $B \rightarrow C$  : *isotherme* ( $T = T_2$ ), le système reçoit la quantité de chaleur  $Q_2 (> 0)$  de la source chaude ;
- $C \rightarrow D$  : *adiabatique* ramenant le système de  $T_2$  à  $T_1$  ;
- $D \rightarrow A$  : *isotherme* ( $T = T_1$ ), le système reçoit la quantité de chaleur  $Q_1 (< 0)$  de la source froide.

Une telle machine est appelée *machine de Carnot*. Dans la figure 1.6 se trouve représenté le diagramme de Clapeyron correspondant au cycle de Carnot pour un gaz.

De nombreux systèmes thermodynamiques ont une efficacité définie à partir de celui du Cycle de Carnot, qui est un cycle théorique.

L'efficacité thermodynamique (ou énergétique) d'un système est définie comme le rapport entre l'énergie utile en sortie de ce système, et l'énergie fournie par les utilisateurs en entrée de ce système :

$$\eta = \text{Efficacité énergétique} = \frac{\text{énergé utile en sortie}}{\text{énergé fournie en entrée}}$$

Le cycle de Carnot étant un cycle moteur, l'énergie utile en sortie est un travail positif  $-W$  correspondant à un travail  $W$  algébrique fourni au fluide négatif, et l'énergie fournie en entrée est sous forme de chaleur, c'est-à-dire qu'il s'agit du transfert thermique avec la source chaude  $Q_c$ .

Par définition, on obtient :

$$\eta = \frac{-W}{Q_c} \quad (4)$$

Par ailleurs, le premier principe de la thermodynamique appliqué à ce cycle :

$$\Delta U = W + Q_f + Q_c = 0 \quad \Rightarrow \quad -W = Q_c + Q_f \quad (5)$$

On obtient donc :

$$\eta = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} \quad (6)$$

L'égalité de Clausius-Carnot affirme que

$$\frac{Q_f}{Q_c} = -\frac{T_f}{T_c} \quad (7)$$

$$\text{Ainsi } \eta = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (8)$$

Il est donc impossible d'obtenir une efficacité de 100 %, même pour le cycle de Carnot moteur entièrement réversible, sauf pour le cas irréaliste où :

$T_f = 0^\circ\text{K}$  (bien sûr l'équation (8) de l'efficacité ne peut être égale à 1 que si la source froide est de  $T_f = 0^\circ\text{K} = -273.15^\circ\text{C}$  )

#### **a/ Efficacité (frigorigique) du cycle de Carnot d'une machine frigorigique**

La réversibilité du cycle de Carnot autorise l'inversion du sens des transformations, conduisant à une inversion de tous les signes des énergies échangées et constituant une machine frigorigique.

Dans le cas d'une machine frigorigique (climatisation, réfrigérateur...), le cycle de Carnot reçoit un travail extérieur et le transforme afin de faire perdre de la chaleur au milieu froid (intérieur d'un réfrigérateur par exemple). L'efficacité d'un tel cycle est donnée par :

$$ec = \frac{Q_f}{W} = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad (9)$$

- $Q_f$  le transfert thermique (chaleur) échangé entre la machine et la source froide
- $W$  le travail total sur le cycle
- $T_f$  la température de la source froide
- $T_c$  la température de la source chaude

Une machine frigorigique ne peut pas avoir un rendement supérieur à celui d'un cycle de Carnot.

#### **b/ Efficacité (thermique) du cycle de Carnot d'une pompe à chaleur**

Dans le cas d'une pompe à chaleur, le cycle de Carnot reçoit un travail extérieur et le transforme afin de faire gagner de la chaleur au milieu chaud (par exemple, l'intérieur d'une maison). L'efficacité d'un tel cycle est donnée par :

$$ec = \frac{-Q_c}{W} = \frac{T_c}{T_c - T_f} \quad (10)$$

- $Q_c$  le transfert thermique (chaleur) échangé entre la machine et la source chaude
- $W$  le travail total sur le cycle
- $T_f$  la température de la source froide
- $T_c$  la température de la source chaude

Une pompe à chaleur ne peut pas avoir un rendement supérieur à celui d'un cycle de Carnot.

### I.2.3 Echanges de travail et chaleur dans une machine de Carnot

#### a/ Machine de Carnot où le système est un gaz parfait

Raisonnons par unité de masse et calculons les chaleurs échangées avec l'extérieur entre chaque étape du cycle (parcouru dans le sens ABCD).

- Sur le chemin isotherme B → C on a:

$$q_2 = pdv = rT_2 \frac{dv}{v} \quad q_2 = rT_2 \int_{vb}^{vc} \frac{dv}{v} = rT_2 \ln \frac{vc}{vb} \quad (11)$$

- De façon similaire, il vient sur le chemin isotherme D → A :

$$q_1 = rT_1 \ln \frac{va}{vd} \quad (12)$$

- Sur le chemin adiabatique, A → B on a:  $P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma$  soit

$$T_1 V_A^{\gamma-1} = T_2 V_B^{\gamma-1} \text{ puisque } PV = rT \text{ et finalement: } \frac{T_2}{T_1} = \frac{V_A^{\gamma-1}}{V_B^{\gamma-1}}$$

- De même sur le chemin adiabatique C → D on a :  $T_2 V_C^{\gamma-1} = T_1 V_D^{\gamma-1}$

$$\text{Ce qui donne } \frac{T_2}{T_1} = \frac{V_A^{\gamma-1}}{V_B^{\gamma-1}} \quad (13)$$

Rappelant que:  $\gamma > 1$ , on déduit des deux derniers résultats :  $\frac{V_A}{V_B} = \frac{V_D}{V_C} \iff \frac{V_A}{V_D} = \frac{V_B}{V_C}$

Ce qui, avec les deux premiers, conduit à :  $\frac{q_1}{q_2} = \frac{-T_1}{T_2} < 0$  d'où  $|q_1| < |q_2|$  (si  $T_1 < T_2$ ).

Le travail reçu est donné par le premier principe qui nous dit qu'au bout d'un cycle la variation d'énergie interne est nulle, et il vient :  $W = -(q_1 + q_2)$  d'où pour un moteur :  $w < 0$  et  $q_1 < 0$  et  $q_2 > 0$  ; et pour une machine frigorifique :  $W > 0$  et  $q_1 > 0$  et  $q_2 < 0$ .

#### b/ - Machine de Carnot quelconque

Les échanges d'énergie dans une machine de Carnot sont indépendants de la nature du système et ne dépendent que de la température des deux sources.

### I.2.4 - Performance d'une machine de Carnot

#### a/ Rendement d'un moteur de Carnot

Pour un moteur, le rendement  $\eta$  défini précédemment est le rapport entre travail fourni par le système et la chaleur consommée (ici  $Q_2$ ) et il vient :

$$\eta_c = \frac{W}{Q_2} = -\frac{W}{Q_2} = 1 + \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} < 1 \quad (14)$$

On remarquera qu'un rendement égal à un exige soit une source froide à  $T_1 = 0 \text{ K}$ , soit une source chaude à  $T_2 \longrightarrow \infty$  (ou les deux à la fois).

### b/ Coefficient de performance frigorifique d'une machine de Carnot

Pour une machine frigorifique, la quantité importante est le rapport entre la chaleur prélevée à la source froide (ici  $Q_1$ ) et le travail nécessaire à cette opération. On définit alors le *coefficient de performance frigorifique* :

$$\omega_{Fc} = \frac{Q_1}{W} = -\frac{Q_1}{Q_1+Q_2} = \frac{T_1}{T_2-T_1} \quad (15)$$

### c/ Coefficient de performance thermique d'une machine de Carnot

Pour une pompe à chaleur, on s'intéresse au rapport entre la chaleur fournie à la source chaude (ici  $Q_2$ ) et le travail nécessaire à cette opération. On définit alors le *coefficient de performance thermique* :

$$\omega_{Ft} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1+Q_2} = \frac{T_2}{T_2-T_1} \quad (16)$$

## I.2.5 Théorème De Carnot

L'intérêt des machines de Carnot réside dans le *théorème de Carnot* : Aucune machine diatherme ne peut être plus efficace qu'une machine de CARNOT fonctionnant entre les deux mêmes sources.

Autrement dit, pour un moteur fonctionnant entre deux sources données :  $\eta \leq \eta_c$  et pour une machine frigorifique (ou une pompe à chaleur) :  $\omega \leq \omega_c$ . Le théorème de CARNOT nous fournit ainsi un rendement (ou un coefficient de performance) théorique maximal (et donc impossible à dépasser).

### DEMONSTRATION pour un moteur thermique

Comparons un moteur thermique réel et un moteur de Carnot fonctionnant entre les mêmes sources et fournissant tous les deux le même travail  $W (< 0)$  à l'extérieur. Ils reçoivent respectivement les chaleurs (positives)  $Q_1$  et  $Q_2$  de la source chaude et par voie de conséquence les chaleurs (négatives)  $Q_1' = -(W+Q_2)$  et  $Q_2' = -(W+Q_1)$  de la source froide. Les rendements correspondants sont :

$$\eta = \frac{W}{Q_2} = \frac{Q_1+Q_2}{Q_2} \quad \eta_r = \eta = \frac{W}{Q_2} = \frac{Q_1'+Q_2'}{Q_2'} \quad (17)$$

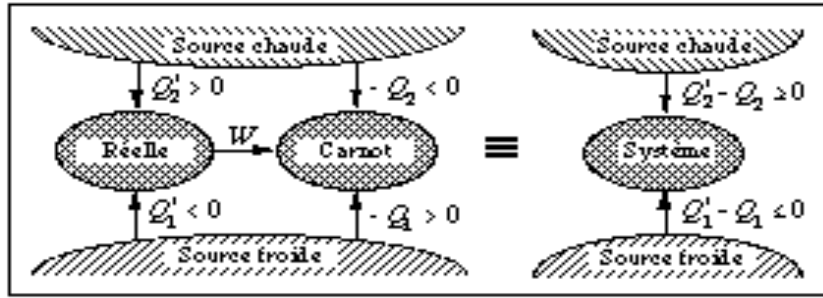


Fig 1.7 Comparaison entre un moteur thermique et celui de Carnot

Inversons maintenant le cycle de Carnot de sorte qu'il fonctionne en machine frigorifique où le travail  $W > 0$  lui est fourni par la machine réelle, les chaleurs échangées voyant leurs signes inversés (Fig. 1.7). Les deux machines fonctionnant ensemble sont équivalentes à une machine unique n'échangeant pas de travail avec l'extérieur et recevant respectivement les chaleurs  $Q_2' - Q_2$  et  $Q_1' - Q_1$  des sources chaude et froide.

L'énoncé de Clausius impose alors que ces chaleurs soient respectivement positive et négative, c'est-à-dire  $Q_2' \geq Q_2$  et d'après le premier principe :

$$\Delta U = Q_1' - Q_1 + Q_2' - Q_2 = 0 \quad \text{soit} \quad Q_1 + Q_2 = Q_1' + Q_2' \quad , \text{ d'où } \eta \leq \eta_r$$

### DEMONSTRATION pour une machine frigorifique

Comparons une machine frigorifique réelle et une machine de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources et nécessitant toutes deux le même travail ( $W > 0$ ) de l'extérieur. Elles prélèvent respectivement les chaleurs (positives)  $Q_1'$  et  $Q_1$  de la source froide et par voie de conséquence les chaleurs (négatives)  $Q_2' = -i(W + Q_1')$  et  $Q_2 = -(W + Q_1)$  de la source chaude. Les coefficients de performance correspondants

$$\text{sont : } \omega_T = \frac{Q_1'}{W} \quad \text{et} \quad \omega_{Tr} = \frac{Q_1}{W}$$

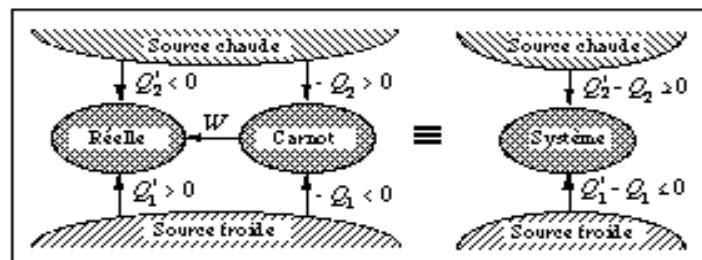


Fig 1.8 Comparaison entre une machine thermique et celle de Carnot

Inversons maintenant le cycle de Carnot de sorte qu'il fonctionne en moteur thermique où le travail  $W (< 0)$  alimente la machine réelle, les chaleurs échangées voyant leurs signes inversés (Fig.1.8). Les deux machines fonctionnant ensemble sont équivalentes à une machine unique n'échangeant pas de travail avec l'extérieur et recevant respectivement les chaleurs  $Q_2' - Q_2 \geq 0$  et  $Q_1' - Q_1 \leq 0$  des sources chaude et froide (les signes étant imposés par l'énoncé de Clausius) soit :  $Q_1' \leq Q_1$  d'où, avec  $W > 0$  :

$$\omega_T \leq \omega_{Tr}$$

Le schéma et les signes des énergies échangées sont les mêmes pour une pompe à chaleur, seule diffère l'expression du rapport qui nous intéresse, c'est-à-dire ici :

$$\omega_T = -\frac{Q_2'}{W} \quad \text{et} \quad \omega_{Tr} = -\frac{Q_2}{W}$$

Comme  $-Q_2' \leq -Q_2$  (avec  $W > 0$ ), on a bien :  $\omega_T \leq \omega_{Tr}$

### **I.3 : Le coefficient de performance du cycle de Carnot**

Autrement dit, pour un moteur fonctionnant entre deux sources données : et pour une machine frigorifique (ou une pompe à chaleur) : Le théorème de CARNOT nous fournit ainsi un rendement (ou un coefficient de performance) théorique maximal (et donc impossible à dépasser).

Le **coefficient de performance**, ou COP (parfois CP), d'une pompe à chaleur

est le quotient de la chaleur produite par le travail fourni.  $COP = \frac{Q}{W}$  (18)

Où Q est la chaleur utile à l'échangeur et W est le travail mécanique absorbé par le compresseur (noté: COP est sans unité, par conséquent dans cette équation, la chaleur et le travail doivent être exprimés dans la même unité.)

Selon cette définition, on voit que le COP est une efficacité énergétique, dans laquelle le système étudié se situe à la sortie du moteur du compresseur (source chaude) : seule l'efficacité du circuit frigorifique est prise en compte.

D'après la première loi de la thermodynamique, dans un système réversible, on peut montrer que  $Q_{chaud} = Q_{froid} + W$  et  $W = Q_{chaud} - Q_{froid}$ , où  $Q_{chaud}$  est la chaleur reçue par le réservoir froid et  $Q_{froid}$  est la chaleur fournie par le réservoir chaud.

Ainsi, en remplaçant W,  $COP_{chauffage} = \frac{Q_{chaud}}{Q_{chaud} - Q_{froid}}$  (19)

Pour une pompe à chaleur fonctionnant avec une efficacité théorique maximum (i.e. efficacité de Carnot), on peut montrer que

$$\frac{Q_{chaud}}{T_{chaud}} = \frac{Q_{froid}}{T_{froid}} \quad \text{et} \quad Q_{froid} = \frac{Q_{chaud} - T_{froid}}{T_{chaud}} \quad (20)$$

où  $T_c$  et  $T_f$  sont respectivement la température du réservoir chaud et du réservoir froid.

$$\text{D'où, } COP_{\text{chauffage}} = \frac{T_{\text{chaud}}}{T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}} \quad (21)$$

$$\text{De même, } COP_{\text{refroidissement}} = \frac{Q_{\text{froid}}}{Q_{\text{chaud}} - Q_{\text{froid}}} = \frac{T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}} \quad (22)$$

Ces équations utilisent la température absolue, comme l'échelle Kelvin. Par exemple, pour une différence de température de 20°C et une température chaude de 300 K (27 °C), le COP chauffage maximum est de 15. C'est la limite absolue qu'aucun appareil ne peut dépasser. En pratique, un COP de 5 est déjà excellent (et suffisant, Cf. infra). (23)

On observe que :  $COP_{\text{refroidissement}} = COP_{\text{chauffage}} - 1$

Le COP chauffage s'applique aux pompes à chaleur et le COP refroidissement s'applique aux climatiseurs et aux réfrigérateurs. Les appareils de chauffage sont décrits dans l'article sur le chauffage.

### **Conditions de fonctionnement**

Le COP dépend de la qualité de l'appareil et de la différence de température, mais il est également sensible à d'autres conditions. Le givrage est par exemple un obstacle pratique qui impose des adaptations techniques ayant un effet négatif sur le COP dès que la température du côté froid s'approche de 0 °C.

Pour le moteur on parle de rendement, et pour la machine on parle de COP.

## **Chapitre II Cycle thermodynamique d'une machine frigorifique à compression de vapeur**

### **II. 1 Représentation du cycle thermodynamique de base (sur un diagramme T-s et P-h) :**

#### **II 1.1 Le Diagramme entropique (T, S)**

Le but primordial de l'utilisation des diagrammes c'est plutôt de faciliter l'étude des fluides notamment ceux réels s'éloignant des propriétés des gaz parfait, vu la complication des équations caractéristiques des gaz réels.

On utilise souvent des tables de valeurs ou des diagrammes..

Pour étudier les évolutions d'un système et faire des bilans énergétiques, on dispose d'un certain nombre de paramètres et de fonctions d'état: T, P, V, U, H, S, G, F.

Du fait de l'équation d'état reliant les paramètres,  $f(P,V,T) = 0$  , il suffit de deux paramètres pour caractériser l'état et les transformations d'un système. On dispose donc d'un certain nombre de couples P-V, T-S, H-S, U-S, P-H,...

Donc, pour l'étude d'un système et de ses transformations on utilise le couple le plus approprié.

On dispose ainsi d'un certain nombre de diagrammes, ayant chacun des propriétés particulières.

Autre explication du couple  $(T, s)$  est aussi très employée. Il correspond au diagramme dit entropique. Son intérêt est d'une part que les compressions et détente isentropiques y sont représentées par des segments verticaux, et d'autre part qu'il se prête bien aux comparaisons avec le cycle de Carnot, comme représenté ci-dessous :  
 Abscisse : Entropie , Ordonnée : Température.

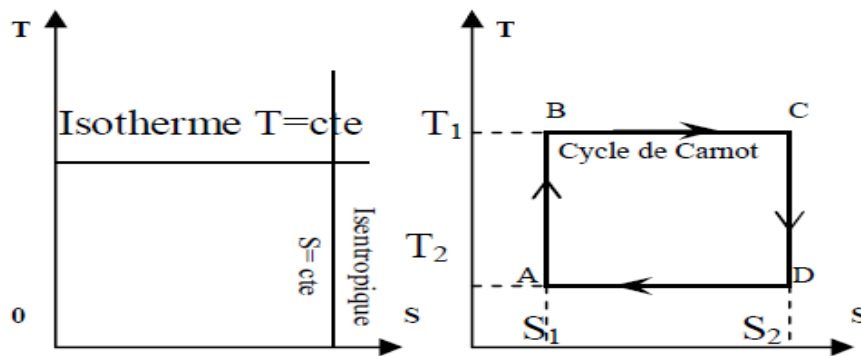


Fig : 2.1 cycle entropique

### II.1.2 Cycle de réfrigération dans le diagramme $(T, S)$

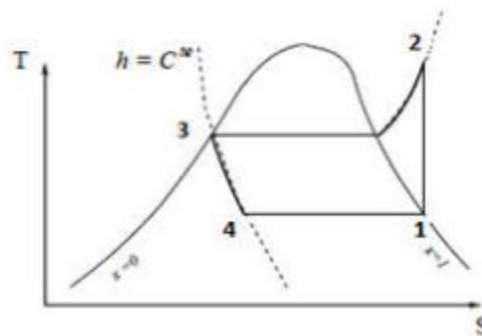


Fig 2.2 l'évolution du cycle de réfrigération à compression de vapeur dans le diagramme  $(T, S)$

C'est le cycle théorique du cycle frigorifique qui est composé des transformations suivantes :

- une compression adiabatique réversible :  $1 \rightarrow 2$
- une condensation isobare :  $2 \rightarrow 3$
- une détente isenthalpique :  $3 \rightarrow 4$
- une vaporisation isobare :  $4 \rightarrow 1$

### II 1.3 Le Diagramme enthalpique (P.h)

Le diagramme enthalpique, aussi appelé diagramme de Mollier, est une notion importante dans la compréhension du cycle frigorifique. Il s'agit d'un graphique spécifique à chaque fluide exprimant son niveau de saturation pression-température sous forme de cloche.

L'axe des abscisses exprime l'enthalpie du fluide soit la quantité d'énergie contenue pour 1 kg de ce dernier. L'axe des ordonnées est consacré à la pression. De manière très simplifiée, voici un diagramme d'enthalpie montrant la cloche de saturation d'un fluide:

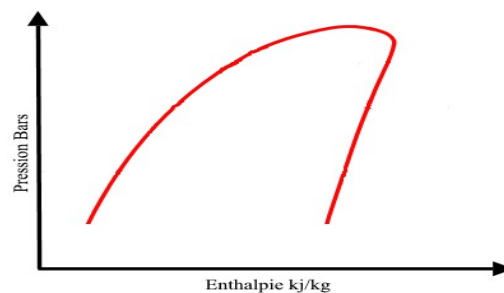


Fig 2.3 Diagramme d'enthalpie de saturation d'un fluide

Au-delà de cette cloche, le fluide est saturé et ne peut plus changer d'état.

#### II.1.3.1 Description du cycle

Afin de comprendre comment fonctionne le cycle frigorifique, il est important de considérer chacune de ses étapes et leur fonctionnement spécifique.

Ce cycle comporte 4 étapes principales à savoir

- L'évaporation
- La compression
- La condensation
- La détente

Selon l'étape, le fluide sera à pression, température et/ou état différent. Le changement de pression est la clé du système frigorifique car elle permet au fluide d'être dans les conditions idéales pour capter ou relâcher les calories.

Voici un schéma-type d'un cycle frigorifique en rapport avec le diagramme enthalpique :

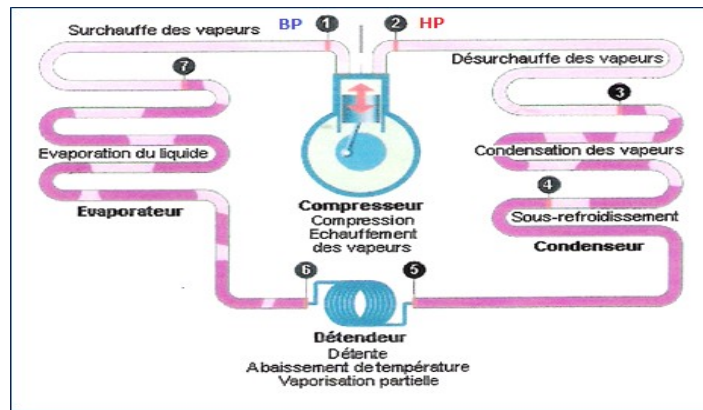


Fig 2.4 Schéma d'un cycle frigorifique [11]

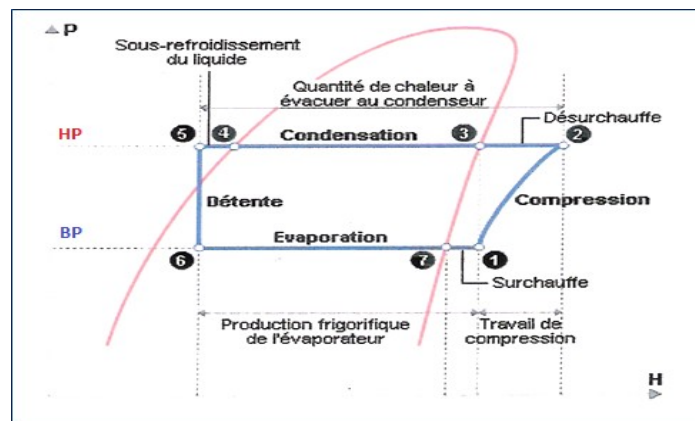


Fig 2.5 Diagramme enthalpique du cycle frigorifique [11]

**HP** : Haute pression

**BP** : Basse pression

**1-2** : Compression

**3-4** : Condensation

**5-6** : Détente

**6-7** : Evaporation

Voici un descriptif de chaque étape :

### **Compression (1-2) :**

La compression est opérée par le compresseur. Celui-ci est un élément du système chargé d'amener le fluide de la **basse pression** à la **haute pression**. Il va compresser le fluide afin d'y augmenter la pression.

Le compresseur est généralement entraîné grâce à de l'énergie électrique et la compression s'y fait la plupart du temps de manière mécanique.

Il est important que le fluide soit entièrement à l'état gazeux pour cette étape car de nombreux compresseurs sont sensibles aux **coups de liquide** c'est-à-dire à la compression d'un liquide. Le fluide à l'état liquide ne réclamant pas les mêmes conditions de compression, il risque de gravement endommager le compresseur s'il y est amené. C'est pourquoi des dispositifs sont prévus pour empêcher ce type d'accident. Nous y reviendrons plus loin.

Par ailleurs, de nombreux compresseurs nécessitent une lubrification constante afin de fonctionner correctement. On mêle alors de l'huile spécialement adaptée au fluide frigorigène lorsqu'il passe par le compresseur.

### **Condensation (3-4) :**

A ce niveau, le fluide est à **haute pression** et chargé des calories captées à l'évaporateur. Son niveau de pression le rend très enclin à céder la chaleur dont il est chargé. Il passe dans un échangeur appelé condenseur où toutes ses calories vont être relâchées alors qu'il repasse à l'état liquide en se condensant. On dit que le milieu dans lequel l'échangeur est installé est la **source chaude** du cycle.

Dans le cas de production de froid, la chaleur relâchée au condenseur peut être soit perdue dans l'environnement soit récupérée selon les cas. La récupération nécessitera alors un dispositif adéquat.

Dans le cas de production de chaleur, c'est l'énergie relâchée par le condenseur qui va être utilisée pour chauffer les locaux. Il faudra donc veiller à ce qu'elle soit maximale.

### **Sous-refroidissement (4-5):**

Le fluide est sous-refroidi afin d'assurer son passage total à l'état liquide.

Le sous-refroidissement est généralement de 4 à 7°C.

Contrairement à la surchauffe, il n'est pas toujours contrôlé car ne présente pas un danger direct pour les composants de l'installation. Il a néanmoins une influence sur l'efficacité du cycle et doit être pris en compte.

### **Détente (5-6) :**

Au niveau de la détente, le fluide frigorigène déchargé de ses calories est ramené de **haute pression** à **basse pression**. Cette diminution de pression est nécessaire afin d'amener le fluide dans des conditions où il pourra à nouveau capter de la chaleur de manière optimale.

Le détendeur est également un dispositif de régulation de débit dans l'installation. Il est pour cela relié de manière physique ou électronique à la sortie de l'évaporateur où il mesure la température du fluide. Il modulera ensuite le débit en fonction de cette dernière.

### **Evaporation (6-7):**

Elle est mise en oeuvre grâce à un échangeur de chaleur appelé évaporateur. On dit qu'il se situe au niveau de la source froide. Le fluide frigorigène y capte la chaleur de l'ambiance afin de passer de l'état liquide à l'état gazeux. Il est alors à **basse pression** et sa température d'évaporation est faible.

Dans le cas de production de froid, on place l'évaporateur dans l'espace à refroidir. Dans le cas d'une pompe à chaleur utilisée pour faire du chaud, l'évaporateur sera placé dans le milieu fournissant les calories. Voici quelques exemples de milieux pour les principaux types de pompe à chaleur :

Type de pompe à chaleur	Source froide
Aérothermique	Air
Hydrothermique	Eau
Géothermique	Sol

### **Surchauffe (7-1)**

On provoque la surchauffe en sortie d'évaporateur pour s'assurer que tout le fluide soit passé à l'état gazeux. On évite ainsi les coups de liquide et on assure le bon fonctionnement de l'installation.

Il faut également maintenir une surchauffe raisonnable afin de pouvoir convenablement déssurchauffer les gaz après la compression. Une surchauffe trop élevée a une incidence sur le taux de compression du fluide et donc sur l'efficacité du compresseur.

La surchauffe est généralement de 5 à 8°C.

La surchauffe est contrôlée par le détendeur. Si elle augmente, le détendeur laisse passer davantage de fluide ce qui augmente le débit. Si le débit augmente, la surchauffe diminuera.

Si par contre la surchauffe diminue, le détendeur réduit le débit de l'installation. Un débit plus faible permet d'augmenter la surchauffe et donc de la rééquilibrer.

Voici un tableau reprenant les différentes caractéristiques du fluide selon son emplacement dans le cycle :

<b>Emplacement du fluide</b>	<b>Niveau de pression</b>	<b>Etat du fluide</b>	<b>Niveau de température</b>
Evaporateur (6-7)	<b>Basse pression</b>	Passage à l'état gazeux	Passage à température élevée
Circuit évaporateur-compresseur (7-1)	<b>Basse pression</b>	Gazeux	Elevée
Compresseur (1-2)	Passage en <b>haute pression</b>	Gazeux	Elevée
Circuit compresseur-condenseur (2-3)	<b>Haute pression</b>	Gazeux	Elevée
Condenseur (3-4)	<b>Haute pression</b>	Passage à l'état liquide	Passage à basse température
Circuit condenseur-détendeur (4-5)	<b>Haute pression</b>	Liquide	Basse
Détendeur (5-6)	Passage à <b>basse pression</b>	Liquide	Basse
Circuit détendeur-évaporateur (6-7)	<b>Basse pression</b>	Liquide	Basse

## **II.2 Représentation du cycle thermodynamique pratique (sur un diagramme T-s et P-h)**

Le cycle frigorifique de référence (cycle pratique) est un compromis qui permet d'effectuer l'étude et le dimensionnement des machines frigorifiques avec une précision acceptable. En pratique, ce cycle est tracé sur les bases suivantes : compression isentropique, détente isenthalpique et surchauffe de 5°C (pour étude de conception) ou SH mesurée sous-refroidissement de 5°C (pour étude de conception) ou SR mesuré. Le cycle frigorifique de référence (cycle pratique) permet de s'affranchir des cycles frigorifiques proposés par la théorie de la thermodynamique appliquée à savoir : le cycle théorique, le cycle parfait et le cycle réel. Néanmoins, ces cycles présentent un grand intérêt pour l'étude théorique des systèmes.

En principe, tout cycle moteur inversé peut être utilisé pour réaliser une machine frigorifique.

En pratique, seuls quelques uns sont utilisés, à savoir, par ordre d'importance, les cycles de Rankine-Hirn, de Joule, et de Stirling-Ericsson.

En outre, il existe des cycles frigorifiques à trois sources de chaleur (trithermes), qui permettent un fonctionnement sans apport de travail : les machines à absorption.

On peut classer les machines frigorifiques selon les applications et les plages de température correspondantes :

De l'ambiance à 5-10 °C : conditionnement d'air, applications alimentaires, . . .

De +10 °C à -18 °C : conservation des denrées alimentaires, production de glace, congélation.

De -18 °C à -40 °C : surgélation (conservation de denrées périssables pendant plusieurs mois).

Jusque -200 °C : applications industrielles notamment liées à l'industrie chimique ou alimentaire : liquéfaction de l'air et du gaz naturel, lyophilisation.

Sous -200 °C : En dessous de la température de liquéfaction de l'azote (77 K), on entre dans la zone des très basses températures. Les applications industrielles sont très limitées (propulsion par fusée à hydrogène et oxygène liquide, aimants à très haute induction, . . .).

## II.2.1 Écarts par rapport au cycle idéal

Les performances des cycles réels sont réduites en raison des écarts suivants par rapport au cycle idéal :

- condenseur non parfait :  $T_{\text{cond}} > T_C$  ;
- évaporateur non parfait :  $T_{\text{evap}} < T_F$  ;
- irréversibilités et échanges de chaleur dans le compresseur ;
- pertes de charge dans les tuyauteries et les échangeurs ;
- surchauffe de la vapeur entre la sortie de l'évaporateur et l'entrée du compresseur due aux défauts d'isolation.

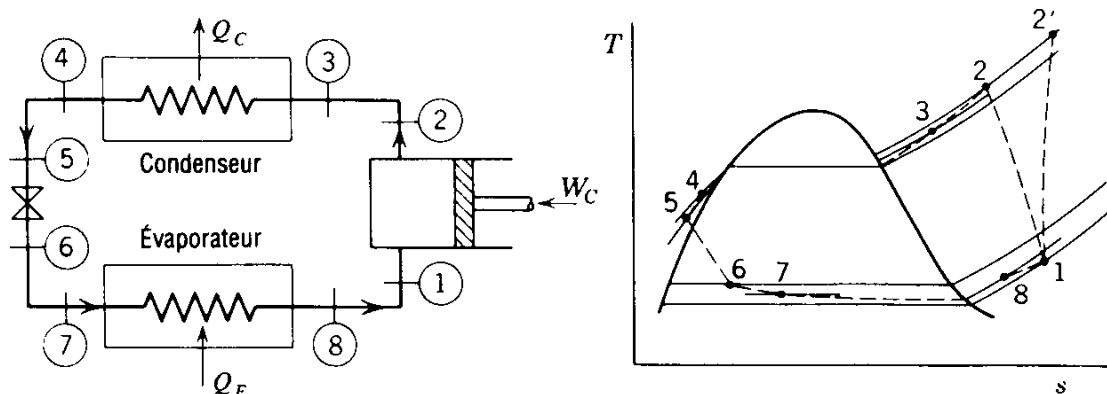


Fig 2.6 Cycle thermodynamique pratique sur un diagramme T-s [3]

## II 3. Bilan thermique du cycle thermodynamique

On sait que le fluide frigorigène circule avec un débit  $q_m$ . Durant un cycle, il va :

- recevoir naturellement de l'énergie de l'ambiance en traversant l'évaporateur.
- recevoir de l'énergie mécanique du compresseur.
- fournir naturellement de l'énergie calorifique à l'ambiance en traversant le condenseur

D'où le bilan thermique d'une machine frigorifique :

Dans ce bilan, nous considérons une machine frigorifique à compression de vapeur à un seul étage dont le cycle thermodynamique est représenté par la figure 2.7.

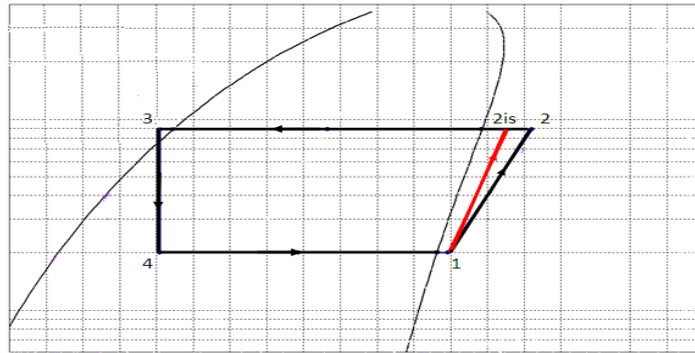


Fig 2.7 cycle thermodynamique

a/ Bilan du détendeur

Le fluide condensé arrive au détendeur au point (3) ou il subit une détente isenthalpique à travers le détendeur. Au cours de cette transformation la variation d'enthalpie est nulle, nous avons :

$$h_4 = h_3$$

A la sortie du détendeur, le fluide se trouve à l'état diphasique. Le titre en vapeur dépend :

- du taux de compression
- de la nature du fluide

b/ Bilan de l'évaporateur

Au niveau de l'évaporateur, le fluide est L'évaporateur est totalement évaporé. La quantité de chaleur absorbée par le fluide frigorigène par unité de masse, soit:  $\Delta h_{ev} = h_1 - h_4$

La puissance frigorifique produite est :

$$Q_{ev} = m(h_1 - h_4)$$

c/ Bilan du compresseur

Le compresseur fournit au fluide de l'énergie en le comprimant de l'état d'aspiration 1 à l'état de refoulement 2. Si on considère que la compression est parfaite le point 2 et le point 1 d'aspiration se trouvent sur la même isentrope.

$$W_{isen} = m(h_2 - h_1)$$

En réalité la transformation réelle n'est pas isentropique, le fluide reçoit de l'énergie mécanique à cause des pertes dues au frottement mécanique des organes en mouvement.

$$W_r = W_{isen} / \eta_i \eta_m$$

$\eta_i$  et  $\eta_m$  représentent respectivement les rendements indiqués et mécaniques.

d/ Bilan du condenseur

A la sortie du compresseur le fluide entre dans le condenseur où il subit une désurchauffe, une condensation et un sous refroidissement. La quantité de chaleur abandonnée au milieu extérieur :

$$Q_c = (h_2 - h_3) \cdot \dot{m}$$

### Le coefficient de performance théorique

Par définition le coefficient de performance d'une machine frigorifique est défini comme le rapport des du froid au niveau de l'évaporateur au travail de compression :

$$\varepsilon = Q_{ev} / W_r$$

On peut également caractériser la qualité de ce cycle en définissant le rendement par rapport à un cycle de Carnot comme le rapport de l'efficacité de la machine  $\varepsilon$  à celui de Carnot, soit

$$\eta = \varepsilon / \varepsilon_c$$

Une Machine réceptrice transmet de la chaleur d'une source froide vers une source chaude (frigo, pompe à chaleur).

A partir de la figure( 2.5), et à partir du premier principe de la thermodynamique, il y a une conservation de l'énergie : c'est-à-dire que la quantité de chaleur rejetée au fluide froid dans le condenseur  $Q_c$  par le fluide frigorigène doit être égale à la somme de la chaleur absorbée à l'évaporateur  $Q_0$  pour produire le froid et plus le travail  $W_{th}$  consommé ou bien l'énergie reçue pour faire fonctionner le compresseur.

D'où l'équation :  $Q_c + Q_0 = W_{th}$

Le choix d'échelle en abscisse (enthalpie  $h$  en [kJ/kg]) est très pratique pour l'exploitation quantitative du diagramme de Mollier, car il permet de lire directement des énergies  $h_i$  aux différents points  $i$  (1, 2, 3, 4, 5, 6,7) du cycle de la machine. On vérifie ainsi le premier principe sur l'échelle en abscisse, car on constate que : Le travail dépensé au compresseur :  $W_{th} = h_2 - h_1$

La quantité de chaleur dégagée par le condenseur :  $Q_c = h_5 - h_2$

La quantité de froid produite par l'évaporateur :  $Q_0 = h_1 - h_6$

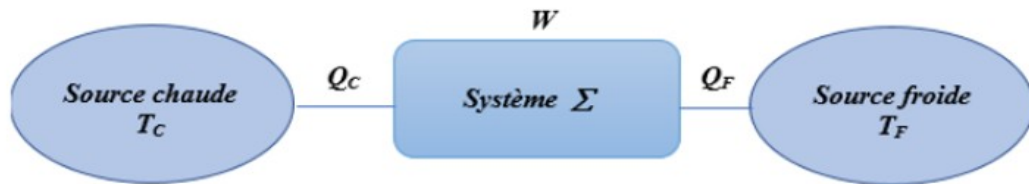
Récapitulatif :

Le bilan énergétique

Les machines fonctionnent par cycle , en appliquant le premier principe de la thermodynamique :  $\Delta U_{\text{cycle}} = W_{\text{cycle}} + Q_{\text{cycle}} = 0$  (1)

En appliquant le deuxième principe de la thermodynamique :

$$\Delta S_{\text{cycle}} = S_{\text{échangée avec l'extérieur}} + S_{\text{créé}} = 0 \quad (2)$$



$$\Delta S_{\text{cycle}} = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} + S_{\text{créé}} = 0 \quad (3)$$

Si la transformation est réversible

$$S_{\text{créé}} = 0 \Rightarrow \Delta S_{\text{cycle}} = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \quad (4)$$

$$\text{Pour un système réel : } S_{\text{créé}} > 0 \Rightarrow \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} < 0 \quad (5)$$

Diagramme de clapeyron (P , V)

Récapitulatif du bilan avec les cycles

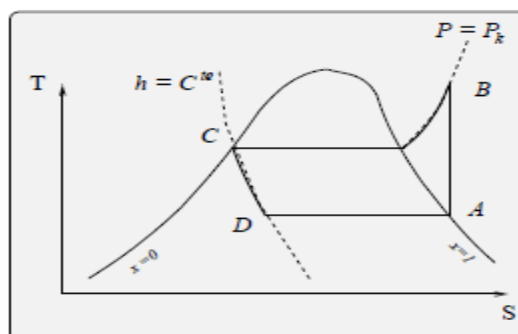


Fig 2.9 Cycle théorique dans le diagramme (T-S) [12]

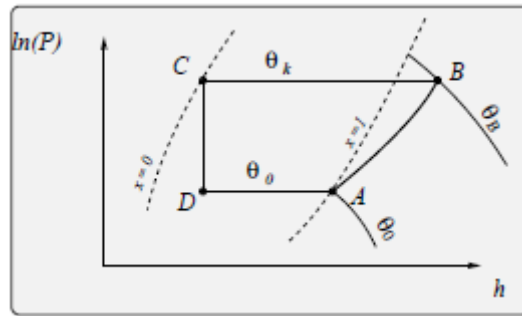


Fig 2.10 Cycle théorique dans le diagramme (ln(P) – h) [12]

Bilan thermique du cycle

Utilisons l'expression du premier principe soit :

$$\Delta W^{mec} + \Delta Q = \Delta H \quad (6)$$

Soit en divisant par la masse totale du fluide :

$$\Delta w_m^{mec} + \Delta q_m = \Delta h \quad (7)$$

Bilan de l'évaporateur ( $w_m = 0$ , car l'évaporateur ne fournit aucun travail

Au fluide) :  $q_{evap} = q_{om} = h_A - h_D > 0$  (8)

Bilan du compresseur : si la compression est adiabatique alors ( $q_{om} = 0$ ) :

$$w_{comp} = w_m = h_B - h_A > 0 \quad (9)$$

Bilan du condenseur ( $w_m = 0$ ) :  $q_{cond} = q_{km} = h_C - h_B < 0$  (10)

Bilan du détendeur :  $w_m = 0, q_m = 0, h_D - h_C = 0$  (11)

En sommant membre \_à membre les équations : (8), (9), (10), (11) , on aura :

$$w_m + q_{om} + q_{km} = 0$$

## II.4 : Notion de fluide frigorigène

### II.4.1 : définition de fluide frigorigène

Les fluides frigorigènes sont des substances ou des mélanges de substances, utilisés dans les circuits de systèmes frigorifiques tels que: des chambres froides, des réfrigérateurs, des vitrines réfrigérées...Les fluides frigorigènes ont la particularité d'avoir sous la pression atmosphérique, une température d'évaporation très faible. Cette propriété thermodynamique permet de produire du froid et du chaud.

► Synonyme : fluide réfrigérant

- Un **fluide frigorigène** est un fluide contenu par un dispositif d'échanges d'énergies (pompe à chaleur, clim, réfrigérateur, congélateur ...)
- Le **fluide frigorigène** peut être une molécule pure ou un mélange de molécules.
- En fonction de la température et de la pression le **fluide frigorigène** peut être en phase liquide, gazeuse ou les deux à la fois.

### Propriétés recherchées d'un fluide frigorigène

- Un **fluide frigorigène** sera utilisé en raison de sa particularité physico-chimique : il a un point d'ébullition très bas. C'est à dire qu'il va s'évaporer à une faible température.
- Un **fluide réfrigérant** a la propriété d'absorption des calories quand il passe de l'état liquide à l'état gazeux. On parle d'une chaleur latente de vaporisation.
- Respect de l'environnement : en raison des risques de fuite dans l'atmosphère, un **fluide frigorigène** devrait être sans danger pour la nature.

Les fluides frigorigènes sont potentiellement **destructeurs de la couche d'ozone**. Pour cette raison les quantités mises en œuvre dans le marché sont contrôlées et font l'objet d'un suivi par l'adème (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)

.Donc, un **fluide frigorigène** est un fluide qui présente des particularités physiques permettant de l'exploiter dans un cycle de compression/détente pour transférer des calories.

Les **fluides frigorigènes** sont choisis pour leurs températures de passage de l'état liquide à l'état gazeux, la quantité d'énergie nécessaire pour provoquer ce changement d'état et la différence de température provoquée par ce changement d'état. On appelle souvent improprement les fluides frigorigènes sous le terme de fréon (marque déposée), comme on parle de Frigidaire pour un réfrigérateur. Les fluides frigorigènes les plus employés actuellement sont les HFC (Hydro Fluoro Carbone). Ils ne contiennent plus de chlore comme c'était le cas pour les CFC (Chloro-Fluoro-Carbone) qui sont maintenant interdits dans les nouvelles installations à cause de leur fort impact sur la réduction de la couche d'ozone (R11, R22). Les fluides frigorigènes les plus courants actuellement dans les installations domestiques sont le R407C et le R410A. Le R407C fonctionne à des pressions moindres qu'un fluide frigorigène est un composé de molécules utilisé pur ou en mélange, qui a comme propriété physique de permettre un transfert d'énergie et ainsi de produire du froid ou du chaud.

#### II.4.2 : Classification des fluides frigorigènes

Les fluides peuvent être classés en quatre familles:

Les substances inorganiques pures

Les hydrocarbures

Les hydrocarbures halogénés

Les autres produits

a/ La famille des fluides inorganiques purs

Les fluides de cette famille sont principalement composés :

d'eau (H<sub>2</sub>O)

d'ammoniac (NH<sub>3</sub>)

et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

Fluides inorganiques purs		
R717	R718	R744

b/ La famille des fluides hydrocarbures

Les fluides de cette famille peuvent être composés :

- de butane

- d'isobutane

- de propane

- de cyclopropane

-le propylène

Fluides Hydrocarbures				
RC270	R290	R600	R600a	R1270

c/ La famille des fluides hydrocarbures halogénés

Les fluides de cette famille sont très largement utilisés mais font désormais l'objet d'interdictions, notamment pour des raisons de toxicité environnementale.

Cette famille de fluides se divise en trois catégories qui sont les CFC, les HCFC et les HFC.

c<sub>1</sub> : Les CFC Chloro Fluoro Carbures

Ce sont les plus connus des hydrocarbures halogénés. Complètement substitués par le chloreofluor, ces hydrocarbures ne contiennent plus d'hydrogène. Ils sont dangereux pour la couche d'ozone

CFC
R11
R12
R113
R115
R502

c<sub>2</sub> : LES HCFC HydroChloroFluoro Carbures

Il s'agit de la seconde génération d'hydrocarbures halogénés utilisés en tant que fluides frigorigènes. Ce sont des composants chimiques formés de chlore, de fluor, d'hydrogène et de carbone. Ils sont dangereux pour l'environnement et feront l'objet d'une interdiction totale vers 2015

HCFC	
R21	R401A
R22	R402A
R123	R408A
R124	R409A
R142b	

c<sub>3</sub> Les HFC HydroFluoroCarbures :

Il s'agit de la troisième génération d'hydrocarbures halogénés utilisés en tant que fluides frigorigènes. Les HFC sont composés de fluor, d'hydrogène et de carbone. Ils ne présentent pas de danger pour la couche d'ozone, mais ils peuvent contribuer à l'effet de serre.

HFC	
R32	R404A
R125	R407C
R134a	R410A
R143a	R507
R152a	

#### d/ La famille des autres fluides

Les fluides de cette famille sont utilisés de façon très ponctuelle et rare. Ainsi on pourra trouver:- Les éthers oxydes- Les amines aliphatiques- Les alcools, le méthanol et l'éthanol- Les composés trihalogénés, fluorés chlorés et bromés (HBCFC, BCFC)

Autres fluides			
R630	R631	R12B1	R13B1

### II.4.3 : Les séries de fluides frigorigènes

(Pour connaître la classification et les propriétés des fluides frigorigènes, voir la norme AFNOR FD-35-430 1998)

#### a/ Série R – 400

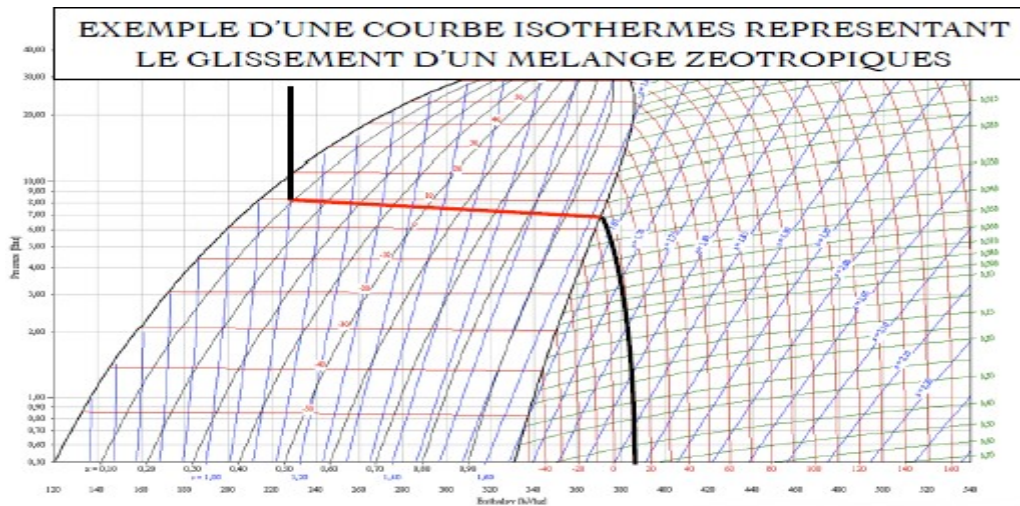
Les fluides de la série 400 sont des mélanges zéotropiques ayant donc un glissement de température en phase latente. Lorsque le gaz atteint l'ébullition, on parle de point de rosé.

Exemples de mélanges:

le R407A est composé de R32 (20%), R125 (40%), R134a (40%)

le R407B est composé de R32 (10%), R125 (70%), R134a (20%)

le R422D est composé de R125 (64,1%), de R134a (31,5%) et de R600a (3,4%) La numérotation est chronologique en fonction de l'acceptation des mélanges par l'ASHRAE. Pour distinguer des mélanges de même corps purs mais dans des proportions différentes, une lettre majuscule (A,B,C,D...) est ajoutée à la fin du code. Ex: R407A, R407B, R407C... La lettre R devant la série signifie réfrigérant. Cela nous indique que c'est un fluide frigorigène. La charge des fluides de la série 400 s'effectue à l'état liquide (robinet rouge sur la bouteille).



b/ Série R – 500

Les fluides de la série 500 sont des mélanges azéotropiques, n'ayant donc pas de glissement de température.

Exemple de mélange:

le R507 est composé de R125 (50%) et de R143a (50%)

On ne parle pas de point de rosé pour les gaz azéotropiques.

Les fluides de la série 500 sont des mélanges de corps purs avec des proportions précises.

Ils se comportent comme un nouveau corps pur, sans glissement.

c/ Série R – 600

Un numéro de la série 600 est attribué aux composés organiques, les hydrocarbures.

Les numéros sont attribués de façon successive.

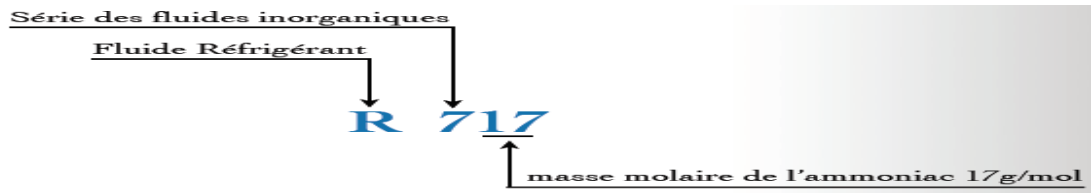
Exemples: R600 (Butane) , R600a (iso butane), R610 (éthyle éther) R611 (méthyle formate).

d/ Série R – 700

Un numéro de la série 700 est attribué aux composés inorganiques : ammoniac, dioxyde de carbone.

La série commence par le chiffre 7 et les deux derniers chiffres correspondent à la masse molaire du composé. Exemple: R717 (masse molaire de l'ammoniac 17g/mol), ou encore

le fluide R744 (masse molaire du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> , 44g/mol)



	Faiblement toxique	Fortement toxique
Hautement inflammable	A3	B3
Inflammable	A2	B2
Non inflammable	A1	B1

## Récapitulation de la classification

### Composés inorganiques

R717	Ammoniac	B2
R718	Eau	A1
R744	Dioxyde de carbone	A1

### Composés organiques

#### Hydrocarbures

R170	Ethane	A3
R290	Propane	A3
R600a	Isobutane	A3

#### Hydrocarbures halogènes

R11	CFC	Trichlorofluoromethane	A1
R12	CFC	Dichlorodifluoromethane	A1
R22	HCFC	chlorodifluoromethane	A1
R141b	HCFC	1.1 dichloro 1.fluoroethane	A2
R142b	HCFC	1.chloro 1.1 difluoroethane	A2

R32	HFC	Difluoromethane	A2
R125	HFC	Pentafluoroethane	A1
R134a	HFC	1.1.1.2 Tetrafluoroethane	A1
R143a	HFC	1.1.1 Trifluoroethane	A2
R152a	HFC	1.1 difluoroethane	A2
R502	HFC	Melange azeotropique	A1
R507	HFC	Melange azeotropique	A1
R404A	HFC	Melange zeotropique	A1
R410A	HFC	Melange zeotropique	A1

Donc, 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 les composés organiques.

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 ( $\text{NH}_3$ ) et il est désigné par R717R 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 »)

27Autres exemples de composés inorganiques : l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) : R718 le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) : R744

Les composés organiques sont des dérivés du méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de l'éthane ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ). Ils se divisent en trois sous familles :

Les corps purs

Les mélanges (de corps purs)

Les hydrocarbures

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

Les CFC (chlorofluorocarbone) – exemple le R12

Les HCFC (hydrochlorofluorocarbone) – exemple le R22

Les HFC (hydrofluorocarbone) – exemple le R134a

La caractéristique principale d'un corps pur est qu'il se condense et s'évapore à température et pression constante.

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 –

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.

Le tableau est une illustration de la désignation des corps purs. Exemples de désignation des corps purs R12 – R22 – R134a.

Désignation	Chiffre des unités	Chiffre des dizaines	Chiffre des centaines	Nombre d'atome de chlore	Formule chimique
R12	2 2 fluor	1 0 hydrogène	0 1 carbone	2 chlore	$\text{CCl}_2\text{F}_2$
R22	2 2 fluor	2 1 hydrogène	0 1 carbone	1 chlore	$\text{CHClF}_2$
R134a	2 2 fluor	3 2 hydrogène	1 2 carbone	0 chlore	$\text{CH}_2\text{FCF}_3$

A partir de la formule chimique des fluides frigorigènes ci-dessus, les dénominations de ces fluides sont les suivantes :

Le Dichlorodifluorométhane ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) pour le R12

Le Monochlorodifluorométhane ( $\text{CHClF}_2$ ) pour le R22

Le Tétrafluoroéthane ( $\text{CH}_2\text{FCF}_3$ ) pour le R134a

Ces appellations ne sont pratiquement pas utilisées en froid.

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) Les mélanges zéotropiques se vaporisent et se condensent non pas à une température constante mais sur une plage de températures (glissement dans les zones de changement d'état).

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.

Dans certaines classifications, les fluides frigorigènes du type HC (hydrocarbures) sont regroupés avec les fluides de la série 700 comme le R717 (ammoniac), le R718 (eau) ou le R744 (dioxyde de carbone) sous la famille des fluides dits « naturels », les autres fluides étant regroupés dans la famille des fluides dits « de synthèse ».

Les impacts environnementaux liés aux fluides frigorigènes reposent sur deux phénomènes :

La destruction de la couche d'ozone

Le réchauffement de la planète

#### **II.4.4 : Classification de fluides frigorigènes en groupes de sécurité**

Cette classification est présentée par deux caractères alphanumériques, par exemple A2.

La lettre majuscule correspond à la toxicité et le chiffre à l'inflammabilité du fluide.

a/ Classement de la toxicité des fluides

On distingue deux groupes A et B :

**Le groupe A** pour lequel il n'y a pas de preuve de toxicité des fluides frigorigènes pour des concentrations inférieures ou égales à 400 ppm.

**Le groupe B** pour lequel il y a des preuves de toxicité pour des concentrations inférieures à 400 ppm.

b/ classement de l'inflammabilité des fluides

On distingue trois groupes 1, 2 et 3 :

**Le groupe 1** : le fluide frigorigène ne permet pas de propagation de la flamme dans l'air à 21°C et 101kPa.

**Le groupe 2** : le fluide frigorigène a une limite inférieure d'inflammabilité supérieure à 0,10kg/m<sup>3</sup> à 21°C et 101kPa et une chaleur de combustion inférieure à 19 kJ/kg.

**Le groupe 3** : le fluide frigorigène est hautement inflammable avec une limite inférieure d'inflammabilité inférieure ou égale à 0,10kg/m<sup>3</sup> à 21°C et 101kPa et une chaleur de combustion supérieure ou égale à 19 kJ/kg.

#### **II.5 Etude des performances (COP, .....)**

## a/ Définition du COP

Qu'est ce que le COP d'une pompe à chaleur ?

Les performances d'une pompe à chaleur (PAC) se mesurent par le **COP**. Cet indice permet de calculer un **coefficient de performance**. Le **COP** reflète le rapport entre la quantité de chaleur produite et l'énergie électrique consommée par la **pompe à chaleur**.

Donc, le coefficient de performance C'est le rapport entre la production frigorifique et le travail effectué pour obtenir cette production frigorifique. La production frigorifique : c'est la quantité de chaleur (exprimée en J) absorbée par seconde par le fluide caloporteur dans l'évaporateur ( ou extraite du milieu à refroidir)

Le **COP** est un coefficient qui va permettre de situer la performance d'un appareil. Ainsi il sera possible de répondre aux questions suivantes :

- Une pompe a chaleur d'un modèle donné sera t'elle plus rentable qu'une autre PAC ?
- Combien d'énergie allez-vous restituer pour une calorie dépensée ?

Le COP est un coefficient de rendement qui rend compte de l'efficacité de la pompe à chaleur en fonction de l'énergie consommée

L'ADEME conseille l'installation d'une pompe à chaleur présentant le COP le plus élevé possible et au minimum supérieur à trois

Le COP est défini par la relation suivante :

$$COP = \frac{\text{Quantité de chaleur produite}}{\text{Energie consommée}}$$

$$COP = \frac{Q}{W}$$

Exemple :  
Une pompe à chaleur consomme 1 kWh d'électricité et puisse 4 kWh dans l'environnement. Cette PAC a un COP de 4.

**COP** = Quantité de chaleur produite / Energie consommée

Où Q est la chaleur utile à l'échangeur et W est le travail mécanique absorbé par le compresseur. Chaleur et travail étant des énergies, exprimées en joules, le COP est sans unité.

Le COP est ainsi une efficacité énergétique, dans laquelle le système étudié se situe à la sortie du moteur du compresseur (source chaude) : seule l'efficacité du circuit frigorifique est prise en compte.

D'après la première loi de la thermodynamique, dans un système réversible, on peut montrer que :

$Q_{chaud} = Q_{froid} + W$ , où  $Q$  est la chaleur reçue par le réservoir froid et  $Q_{froid}$  la chaleur fournie par le réservoir chaud.

Voir le détail sur la COP (chauffage et refroidissement) dans la page 13.

Donc, le coefficient de Performance (COP) est un coefficient d'efficacité frigorifique (EER).

Le **COP** : coefficient de performances. C'est le rapport entre l'énergie utile (la chaleur délivrée par la PAC) et l'énergie fournie (l'énergie pour entraîner le compresseur)

**COP = énergie utile / énergie fournie**

Le COP global de la PAC tient compte des auxiliaires et intègre les consommations d'énergie pour le dégivrage.

L'**EER** : coefficient d'efficacité frigorifique. Il représente la performance énergétique de la pompe à chaleur fonctionnant en mode rafraîchissement/climatisation.

**EER = énergie utile (chaleur absorbée à l'évaporateur) / énergie fournie (au compresseur)**

Récapitulation :

Un climatiseur est énergétiquement efficace s'il demande peu d'énergie électrique au compresseur pour atteindre une puissance frigorifique donnée.

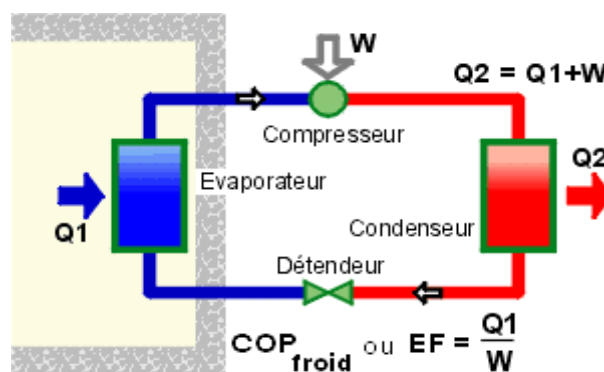


Fig 2.11 schéma avec bilan d'une machine thermique

En comparant les offres, on établit le rapport entre puissance frigorifique fournie et puissance électrique absorbée par le compresseur.

Remarques.

- 1 Il ne faut pas confondre COP froid et COP chaud ! Le COP chaud est le rapport entre l'énergie thermique délivrée au condenseur et l'énergie électrique demandée par le compresseur (c'est un terme qui vient de l'évaluation du rendement d'une pompe à chaleur). Alors que le COP froid part de la chaleur captée à l'évaporateur. La confusion étant fréquente, il n'est pas inutile lorsque l'on compare le rendement des machines dans les documentations de constructeurs, de vérifier ce qui se trouve derrière l'appellation COP.
- 2 Il est intéressant de s'inquiéter également de l'efficacité globale de la machine frigorifique installée, c'est à dire du rapport entre le froid produit et l'ensemble de toutes les consommations électriques engendrées, y compris les ventilateurs aux échangeurs, les pompes... Une machine frigorifique, avec une efficacité excellente, placée sur le toit d'un immeuble de plusieurs étages, peut voir son efficacité fortement chuter si la machine est placée en cave et que le condenseur est refroidi via un gainage d'air traversant les étages ! La consommation du ventilateur sera importante dans le bilan final.
- 3 Il est très important de se rendre compte que l'énergie mécanique des ventilateurs et des pompes se dégradera en chaleur. Cette chaleur vient en diminution de la puissance frigorifique pour les éléments du côté froid. Ce n'est donc pas seulement le COP ou l'EE qui se dégradent par la consommation électrique supplémentaire, c'est aussi la puissance frigorifique qui diminue.

Un indice de mesure d'efficacité : le COP

De l'analyse du [fonctionnement thermodynamique de la machine frigorifique](#), on déduit son efficacité énergétique. C'est le rapport entre la quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur et la quantité d'énergie électrique totale absorbée par l'installation, soit principalement le compresseur mais également les équipements annexes (ventilateurs, pompes de circulation d'eau, ...)

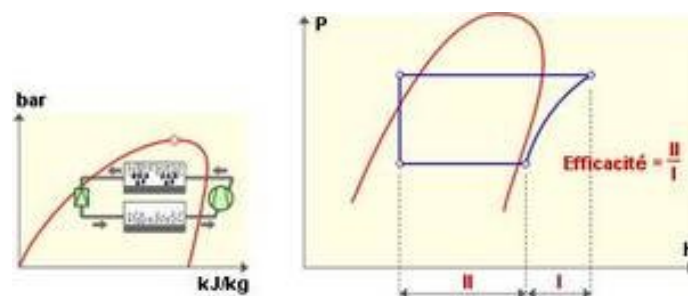


Fig 2.12 Efficacité théorique d'une machine frigorifique. [11]

Le bilan énergétique d'une machine frigorifique apparaît sur le diagramme : toute l'énergie captée dans le bâtiment par l'évaporateur (II), plus l'énergie utilisée par le compresseur (I), doit être évacuée par le condenseur vers l'air extérieur (I + II).

L'installation de réfrigération sera donc énergétiquement efficace si elle demande peu d'énergie électrique au compresseur pour atteindre une puissance frigorifique donnée à l'évaporateur.

Appliquons ceci à un climatiseur :

Évaluer l'efficacité frigorifique d'un appareil, c'est établir le rapport entre énergie frigorifique fournie et énergie électrique absorbée par le compresseur.

Quelle valeur de COP atteinte ?

On trouvera dans le tableau ci-dessous, les valeurs recommandées par le standard ARI.

Type d'équipement	COP min. recommandé (kW <sub>r</sub> /kWe)
<b>Climatiseurs de fenêtre</b>	2,8
<b>Split systèmes</b>	
- Jusqu'à 4 kW <sub>r</sub>	2,8
- Supérieur à 4 kW <sub>r</sub>	3,0
<b>Conditionneurs d'air monobloc</b> <i>À refroidissement par air</i>	
- Jusqu'à 10 kW <sub>r</sub>	2,5
- Supérieur à 10 kW <sub>r</sub>	2,9
<i>À refroidissement par eau</i>	3,5
<b>Groupes de production d'eau glacée à pistons</b> <i>À refroidissement par air</i>	3,0
- Jusqu'à 100 kW <sub>r</sub>	3,0
- Supérieur à 100 kW <sub>r</sub>	
<i>À refroidissement par eau</i> - Jusqu'à 10 kW <sub>r</sub>	3,7
- Supérieur à 10 kW <sub>r</sub>	4,0
<b>Groupes de production d'eau glacée à vis</b>	
<i>À refroidissement par air</i>	4,5
<i>À refroidissement par eau</i>	
- Jusqu'à 800 kW <sub>r</sub>	4,6
- Supérieur à 800 kW <sub>r</sub>	5,0

<b>Groupes de production d'eau glacée centrifuges</b>	
	3,8
<i>À refroidissement par air</i> - Jusqu'à 800 kW <sub>r</sub>	3,8
- Supérieur à 800 kW <sub>r</sub>	4,5
<i>À refroidissement par eau</i> - Jusqu'à 800 kW <sub>r</sub>	4,7
- Supérieur à 800 kW <sub>r</sub>	

- Conditions standard pour climatiseurs, splits et systèmes monoblocs à refroidissement par air (standard ARI 510) : conditions intérieures = 27°C, 50% HR ; conditions extérieures = 35°C bulbe sec et 24°C bulbe humide.
- Conditions standard pour groupes de production d'eau glacée à refroidissement par eau (standard ARI 550-92) : température départ / retour eau glacée = 6,7°C / 12,2°C ; température entrée/sortie eau de condensation = 29,4°C / 35,0°C.

Pour rappel, le COP est le coefficient d'efficacité d'une installation produisant ou transférant de la chaleur. Au niveau du cycle frigorifique, il varie en fonction de l'écart de température (appelé "delta t") entre la source froide et la source chaude.

Autrement dit, si on désire une température de local élevée alors que la température extérieure est basse, le COP va diminuer. L'inverse est également vrai.

Plus précisément, une diminution de 1 K de la source froide va diminuer le COP de 1,8 %. Une augmentation de 1 K de celle ci permettra en revanche d'augmenter le COP de 1,6%.

Voici 2 exemples de cycles frigorifiques dont on peut constater les différents deltas t entre source chaude et source froide.

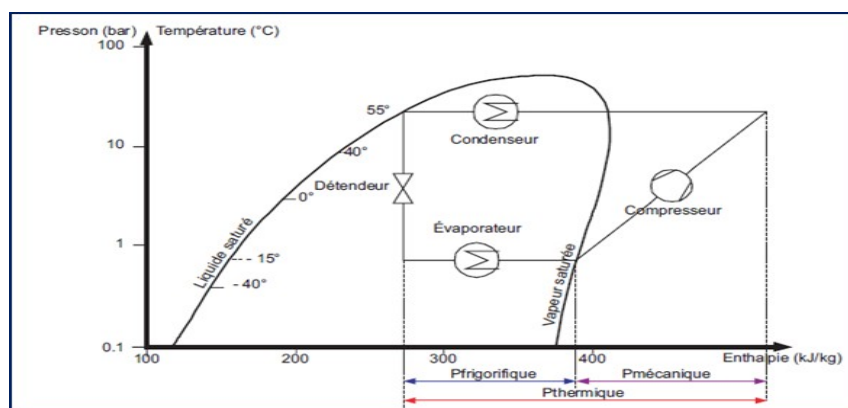


Fig 2.13 cycle frigorifique à écart de température important

L'écart dans ce diagramme est important. Comme on peut observer, températures et pressions sont intimement liées et un delta t élevé entrainera un plus grand écart HP-

BP. On constate que, pour faire passer le fluide de basse pression à haute pression, le compresseur devra fournir un travail mécanique important par rapport à la puissance thermique globale. Cela aura un impact sur le COP qui diminuera.

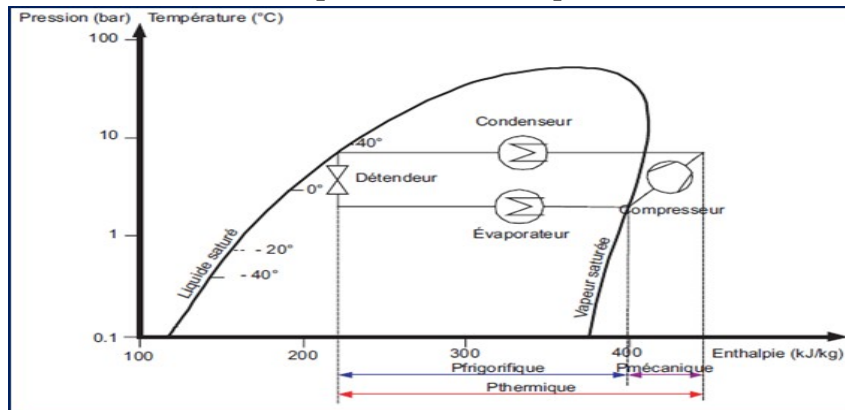


Fig 2.14 cycle frigorifique à faible écart de température

A l'inverse, ce diagramme est celui d'un cycle frigorifique où l'écart de température est faible. On peut constater que le travail mécanique à fournir par le compresseur sera faible par rapport à la puissance thermique dégagée. Cela aura pour conséquence un COP plus élevé.

Transfère de la chaleur d'une source froide vers une source chaude (frigo, pompe à chaleur).

Machine frigorifique : on définit un coefficient d'effet frigorifique  $\sum \dot{Q}_{fr} / W_{fourni}$

Pompe à chaleur : on définit un coefficient de performance (COP)  $\varnothing = Q_{ch} / W_{fourni}$

## II.6 Application industrielle du froid

Le froid est aujourd'hui omniprésent dans notre vie quotidienne.

L'utilisation la plus répandue de la production de froid est la conservation des aliments, d'une part au niveau domestique, avec les réfrigérateurs et congélateurs individuels, d'autre part à un niveau commercial, avec les congélateurs des magasins d'alimentation et les chaînes du froid de l'industrie agroalimentaire. Les deux niveaux de froid concernés sont la réfrigération (température proche de 0 °C), qui permet une conservation des denrées simplement refroidies pour des durées n'excédant pas quelques jours, et la congélation (température de l'ordre de -20 °C), qui permet de transformer en glace toute l'eau contenue dans les aliments, stoppant ainsi pratiquement tout métabolisme et toute transformation chimique, et figeant (fixant) donc les aliments dans l'état dans lequel ils se trouvaient au moment de la congélation,

ce qui leur assure une conservation de plusieurs mois, sous réserve d'un bon conditionnement.

#### a/ Le Froid Industriel

Avec la multiplication des approvisionnements à basse température, la production du froid intervient directement dans la chaîne qualité de conservation des températures. Que ce soit en entrepôt, en distribution, chez les industriels, pendant le transport, depuis l'élaboration jusqu'à la distribution, la qualité des équipements de production du froid industriel doit être maximale.

Les techniciens et les chercheurs s'engagent à promouvoir la connaissance du froid au niveau mondial dans toutes ses applications et toutes ses technologies afin d'améliorer la qualité de la vie en respectant l'environnement et en accord avec les impératifs économiques ;

- la qualité et la sécurité des produits alimentaires de la fourche à la fourchette
- le confort dans les immeubles résidentiels et commerciaux
- les produits et les services de santé
- les technologies des très basses températures et de liquéfaction des gaz
- l'efficacité énergétique
- l'utilisation de frigorigènes à faible impact sur la couche d'ozone et sur le réchauffement planétaire, sans négliger la sécurité

Donc le froid industriel est le domaine d'intervention qui englobe les activités de design et de mise en œuvre des équipements frigorifiques. Au cours des dernières décennies, l'industrie du froid industriel a mis l'accent sur l'amélioration de l'efficacité énergétique de ses équipements et mis sur le marché de nouveaux systèmes de régulation et de contrôle, qui permettent le suivi de ces derniers.

Réduire les émissions de gaz nocifs dans l'atmosphère est la tâche sur laquelle nous avons beaucoup travaillé des dernières années.

En général, les processus dans lesquels nous participons pour l'installation du froid industriel sont les suivants :

- Systèmes frigorifiques pour les chambres de réfrigération et frigorifiques, configurés dans des entrepôts ou étages industriels pour le stockage ou produits surgelés.
- Centrales de froid dans le commerce au détail.
- Réfrigération des comptoirs d'exposition des produits périssables.
- Systèmes de refroidissement industriels.

Depuis plusieurs années, fabricants et installateurs font un grand effort pour réduire les émissions des gaz fluorés d'effet de serre dans l'atmosphère car ils ont des conséquences négatives pour l'environnement. Et c'est dans cette direction que nous

devons continuer pour chercher des solutions d'économie d'énergie comme produire du froid en heures creuses, l'accumuler et l'utiliser dans les heures de pointe où le prix du kw/h est élevé.

Nous pouvons relever, par exemple, l'utilisation de CO<sub>2</sub> en tant que réfrigérant en cascade avec de l'ammoniac ou du R134A. Cela suppose un grand gain énergétique par rapport à d'autres réfrigérants, et si nous ajoutons à cela, l'installation de variateur de fréquence en compression et en condensation, nous pouvons obtenir des rendements élevés conjointement à la condensation et évaporation flottante.

**La maîtrise des températures et de l'énergie pour la conservation de la chaîne du froid :**

- Des **productions frigorifiques** tous fluides (HFC, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, frigoporteurs)
- Des **systèmes de gestion** des températures et de l'énergie
- Des **systèmes de contrôle et de gestion** des températures et de l'énergie

b/ le froid commercial

Le froid commercial : commerce traditionnel et grande distribution

En résumé:

- 1 le domaine médicale: la conservation de certains produits médicaux, les organes ,: La cryochirurgie (aussi appelée cryothérapie) est l'utilisation du froid extrême produit par l'azote liquide (ou le gaz argon) pour détruire les tissus anormaux. La cryochirurgie est utilisée pour traiter des tumeurs externes comme celles de la peau et est aussi utilisée pour traiter des tumeurs situées à l'intérieur du corps (tumeurs internes et tumeurs des os).
- 2 domaine industriel agroalimentaire: la conservation des produits alimentaires.
- 3 l'industrie chimique et pétrochimique: liquéfaction des gaz pour le transfert par pipe.
- 4 Le rafraichissement des locaux

**Froid industriel et commercial**

- Les **usines agro-alimentaires**
- Les **stations fruitières**
- Les **sociétés d'import-export de fruits et légumes**

- Les **commerces alimentaires**: boucheries, boulangeries, points chauds, charcuteries, poissonneries, supermarchés, hypermarchés, coopératives agricoles, les caves vinicoles...



- 

### **vitrites et meubles frigorifiques de vente :**

- Vitrine de service arrière, glaces verticales ou bombées , fixes ou relevables, service avant, vitrines d'angles, vitrines à pâtisserie...



- **Chambres froides**

- positives , négatives, laboratoire de préparation, atelier de découpe



### **Soufflage par gaine textile**

La gaine textile est un outil de diffusion d'air qui évite l'effet courant d'air pour le personnel travaillant dans la zone traitée.



### **Groupe de condensation :**

- Ensemble regroupant le compresseur, le condenseur, le ventilateur, le coffret électriques, les organes de régulation et de sécurité.
- Il peut être carrossé ou non. Il est souvent à l'extérieur, mais peut être installé à l'intérieur sous certaines conditions.
- **Mais également** : constructions isothermes, portes isothermes pivotantes, coulissantes, portes automatiques, centrale de production frigorifique détente directe et eau glycolée, échangeurs, machines à glaçons, à glace écaillé ou en grains, des meubles frigorifiques de vente, refroidisseurs par glace liquide, stockage de froid par chaleur latente, une gestion technique centralisée (GTC) supervision...

c/ Conditionnement de l'air

- Les **particuliers**
- Les **professionnels**
- Les **commerces**
- Les **bureaux**
- Les **administrations**

### Les différents produits



#### Unité intérieure plafonnière :

Permet de traiter des grands volumes, parfaitement adapté aux commerces, laboratoires



#### Unité intérieure gainable :

Elle est cachée dans un local technique ou un faux plafond et l'air est distribué dans les locaux par un réseau de gaines isolées et des diffuseurs.



### **Cassette plafonnière encastrée :**

On ne voit que la façade (3 cm) , les organes sont accessibles directement, systèmes adaptés aux bureaux, boutiques .



### **Ventilo-convecteur :**

C'est radiateur ventilé qui peut être posé en allège, ou plafonnier , mais aussi non carrossé il peut être caché dans un faux plafond.



### **Unité intérieure allège :**

C'est un climatiseur fixé au mur et situé très près du sol.

Il se présente généralement comme une sorte de radiateur.



### **PAC AIR/EAU :**

Cet appareil capte la chaleur de l'air extérieur et la transmet via un réseau d'eau à des unités terminales pour chauffer des locaux d'habitation.

**Et tout autres produits, tels que :** des soufflages par gaine, des splits systèmes et multi-split, des invertis VRV, des planchers chauffants rafraîchissants, des pompes à chaleur air/air et air/eau-chauffée, de l'eau thermodynamique, des régulations, une

gestion technique centralisée, des unités terminales, une centrale de traitement d'air, des ventilo-convecteurs, des groupes refroidisseurs de liquide...

### Grande cuisine et buanderie

- Les **usines agro-alimentaires**
- Les **restaurants privés, bars, hôtellerie**
- Les **collectivités** : cantine, restaurant d'entreprise, self-service
- Les **commerces alimentaires** : boucheries, boulangeries, charcuteries, poissonneries, supermarchés, hypermarchés, les caves vinicoles...

### Les différents produits

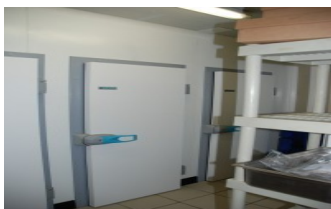


**Meubles froid** : vertical ou horizontal permet la conservation des matières premières et des produits finis.



**Fourneau :**

Electrique ou gaz, avec ou sans four, c'est l'outil de travail du chef.



**Chambre froide :**

C'est une pièce isolée et équipée pour maintenir à la bonne température Les denrées.



### **Hotte cuisson :**

Indispensable en cuisine, elle permet d'évacuer les fumées, ainsi que les graisses de cuisines. Elle élimine toutes odeurs, en renouvelant l'air.

**Mais également des produits tels que :** la ventilation, les plonges, les locaux de préparation, les lave-mains, les inox, des appareils de cuissons horizontales : fourneau, grillade, plaque coup de feu, friteuse... Pour la cuisson verticale : four mixte, de remise en température, les équipements frigorifiques, les cellules de refroidissement, de congélation, la distribution des repas, self-service, la laverie vaisselle, le matériel de buanderie, le rayonnage, les vestiaires...

Donc en résumé

Nos domaines d'application sont diversifiés :

- Agro-alimentaires
- Centre de logistiques
- Entrepôts de stockage, de produits frais et congelés
- Industrie de boissons et industrie laitières
- Ateliers de viandes, fruits et légumes
- Industrie pharmaceutiques
- Industrie pétrochimique
- Industrie aéronautique

### **Chapitre III Composants d'une machine frigorifique à compression de vapeur**

Le transfert de chaleur, entre intérieur et extérieur, ne peut se faire que si un équipement rehausse le niveau de température entre le milieu où la chaleur est prise (air ou eau) et le milieu où la chaleur est évacuée (air extérieur), c'est le rôle de la machine frigorifique.

Elle se compose au minimum des 4 éléments suivants :

- 1 compresseur
- 1 évaporateur

- 1 condenseur
- 1 détenteur

Voici le fonctionnement de chacun de ces composants.

### **Tout est basé sur les propriétés physiques du fluide frigorigène**

La machine frigorifique est basée sur la propriété des fluides frigorigènes de s'évaporer et de se condenser à des températures différentes en fonction de la pression.

Pour expliquer le fonctionnement, nous prendrons les caractéristiques du R 22 parce c'est le fluide encore le plus couramment utilisé en froid alimentaire. Mais ce n'est plus celui que l'on choisira dans les installations nouvelles.

#### **A la pression atmosphérique**

Le R22 est liquide à - 45 °C et se met à "bouillir" aux alentours de - 40 °C.

- Si du fluide R 22 à - 45 °C circule dans un serpentin et que l'air à 20 °C passe autour de ce tuyau, l'air se refroidira : il cédera sa chaleur au fluide qui lui s'évaporerait. C'est le rôle de l'évaporateur de la machine frigorifique.

#### **A la pression de 13 bars**

Cette fois, le R 22 ne va "bouillir" qu'à 33 °C. Autrement dit, si de la vapeur de fluide à 13 bars et à 65 °C circule dans un serpentin et que de l'air à 20° C passe autour de ce tuyau, le fluide se refroidira et à partir de 33 °C, il se liquéfiera, il se condensera. En se condensant, il va libérer énormément de chaleur. C'est le rôle du condenseur de la machine frigorifique.

- Si l'on souhaite donc que le fluide puisse "prendre" de la chaleur : il doit être à basse pression et à basse température sous forme liquide, pour lui permettre de s'évaporer.
- Si l'on souhaite qu'il puisse céder sa chaleur : il doit être à haute température et à haute pression, sous forme vapeur, pour lui permettre de se condenser.

Pour réaliser un cycle dans lequel de la chaleur est extraite d'un côté et donnée à l'autre, il faut compléter l'installation par 2 éléments :

- **Le compresseur**, qui comprime le gaz en provoquant l'augmentation de température jusqu'à + 65 °C.
- **Le détenteur**, qui, au départ d'un fluide à l'état liquide, "lâche" la pression : le fluide se vaporise partiellement et donc se refroidit. Le liquide retombe à la température de - 40 °C (bien sûr, on choisira - 40 °C pour faire de la congélation, et entre 0°C et + 5 °C pour de la climatisation).

Si ces différents équipements sont bouclés sur un circuit, on obtient une machine frigorifique.

En pratique, suivons le parcours du fluide frigorigène dans les différents équipements et repérons le tracé de l'évolution du fluide frigorigène dans le diagramme des thermodynamiciens, le diagramme H-P, enthalpie (ou niveau d'énergie) en abscisse et pression en ordonnée.

### III.1 Le compresseur

Le compresseur va tout d'abord aspirer le gaz frigorigène à basse pression et à basse température (1). L'énergie mécanique apportée par le compresseur va permettre d'élever la pression et la température du gaz frigorigène. Une augmentation d'enthalpie en résultera.

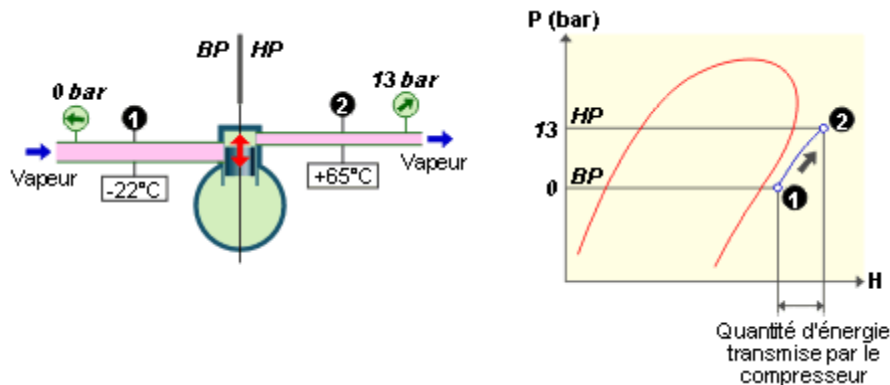


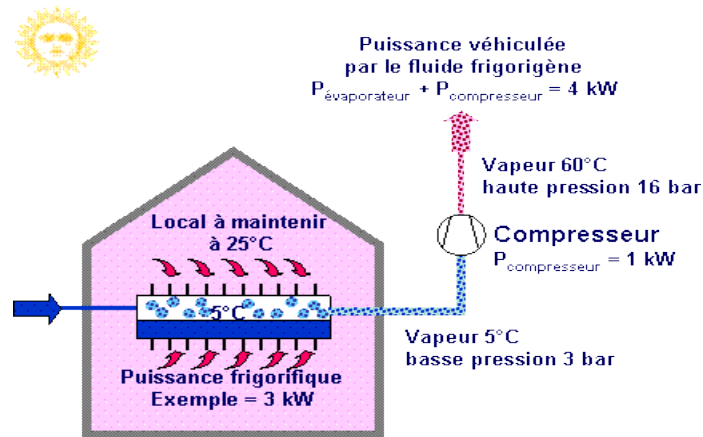
Fig 3.1 Fonctionnement du compresseur [11]

Il faut trouver un moyen d'évacuer l'énergie contenue dans les vapeurs froides qui sortent de l'évaporateur. On souhaite la rejeter dans un milieu extérieur tel que la rue. Or, celle-ci se trouve à une température beaucoup plus élevée que celle de la vapeur à refroidir... Ce n'est donc pas évident.

Une astuce va consister à comprimer le gaz jusqu'à ce que sa température devienne plus élevée que celle du milieu extérieur.

Nous avons tous un jour gonflé le pneu d'une bicyclette et noté que la compression de l'air s'accompagnait d'une montée en température. C'est ce phénomène que l'on utilise.

Cette compression nécessitera un apport supplémentaire d'énergie. L'énergie nécessaire sera de l'ordre du tiers de celle prélevée. Si la puissance de l'évaporateur est de 3 kW, il faudra consommer environ 1 kW pour effectuer la compression.



Pour 3 [kW] prélevés dans le local à refroidir (puissance frigorifique), une compression correspondant à un apport énergétique de 1 [kW] sera nécessaire. On dira alors que le **coefficient de performance** (ou d'effet) **frigorifique** est de 3, rapport entre la puissance de l'évaporateur et celle du compresseur.

En sortie du compresseur, la vapeur est à haute pression. Elle contient la puissance prélevée à l'évaporateur, augmentée de celle apportée par la compression, soit 4 [kW] pour notre exemple.

### Question

Indiquez, aussi clairement et complètement que possible, toutes les différences que présente le fluide frigorigène entre l'entrée et la sortie du compresseur, notamment pour ce qui concerne l'énergie qu'il contient .

### III. 2 L'évaporateur

Le fluide frigorigène liquide entre en ébullition et s'évapore en absorbant la chaleur du fluide extérieur. Dans un deuxième temps, le gaz formé est encore légèrement réchauffé par le fluide extérieur, c'est ce qu'on appelle la phase de surchauffe (entre 7 et 1).

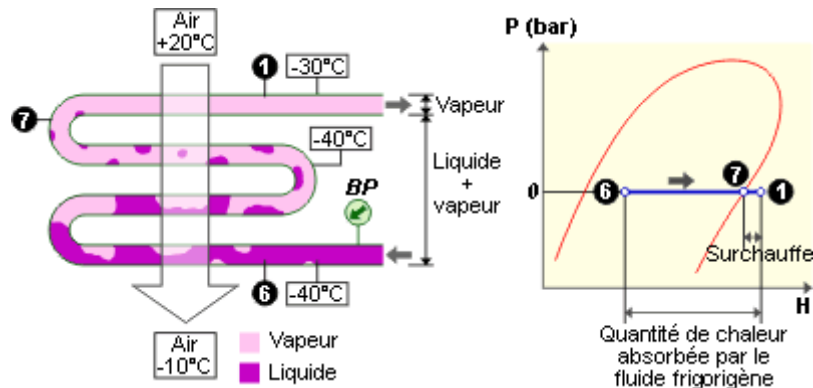
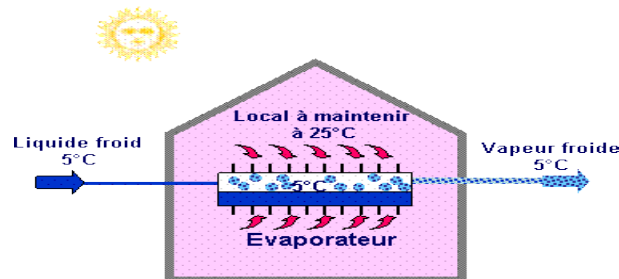


Fig 3.2 Fonctionnement de l'évaporateur. [11]

**Donc, l'évaporateur** (c'est la partie froide de la machine)

Ce composant permet de refroidir le local en y prélevant de la chaleur. Le fluide frigorigène s'y évapore. On l'appelle évaporateur.



Notons que sur le schéma, la température du fluide frigorigène est la même en entrée et en sortie de l'évaporateur. Comme l'eau dont l'ébullition s'effectue dans la cuisine à la température constante de 100°C, le fluide frigorigène s'évapore sans changer de température.

En réalité, on verra qu'en pratique, on veille à ce que le frigorigène sorte légèrement "surchauffé" de l'évaporateur, mais ce n'est pas pour le moment le sujet.

La puissance prélevée dans le local sera appelée puissance frigorifique ou puissance de l'évaporateur.

### Question

Indiquez, aussi clairement et complètement que possible, toutes les différences que présente le fluide frigorigène entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur.

*La réponse*

*A ce stade, le refroidissement du local étant effectué, il reste à évacuer l'énergie prélevée. Cette énergie est maintenant contenue dans le fluide frigorigène.*

### III. 3 Le condenseur

Le gaz chaud provenant du compresseur va céder sa chaleur au fluide extérieur. Les vapeurs de fluide frigorigène se refroidissent ("désurchauffe"), avant l'apparition de la première goutte de liquide (point 3). Puis la condensation s'effectue jusqu'à la disparition de la dernière bulle de vapeur (point 4). Le fluide liquide peut alors se refroidir de quelques degrés (sous-refroidissement) avant de quitter le condenseur.

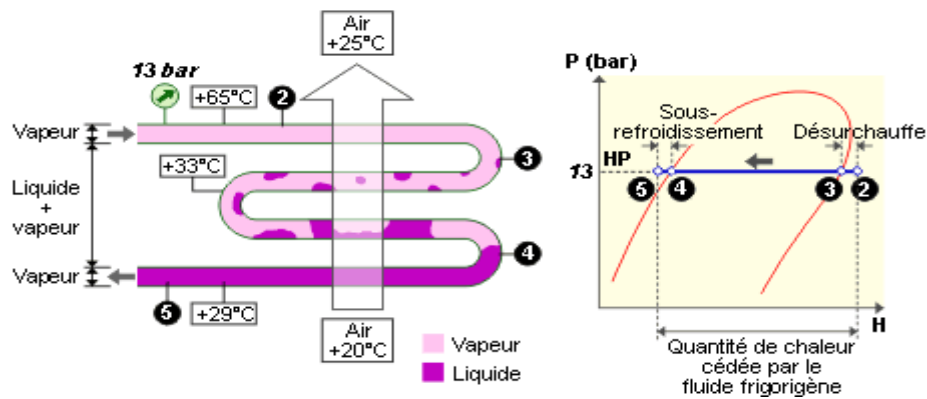
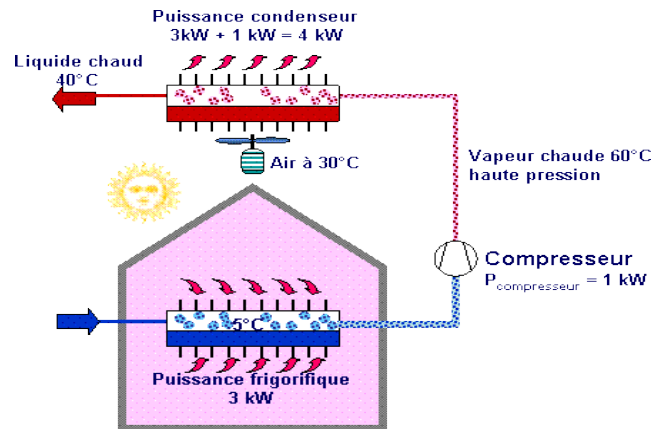


Fig 3.3 Fonctionnement du condenseur. [11]

**Le condenseur** (c'est la partie chaude de la machine frigorifique)

Ce composant permet d'évacuer l'énergie contenue dans le fluide frigorigène. Le fluide s'y condensera en restituant l'énergie qu'il véhicule.



### Question

**Q3:** Indiquez, aussi clairement et complètement que possible, toutes les différences que présente le fluide frigorigène entre l'entrée et la sortie du condenseur, notamment pour ce qui concerne l'énergie qu'il contient.

### III. 4 Le 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.

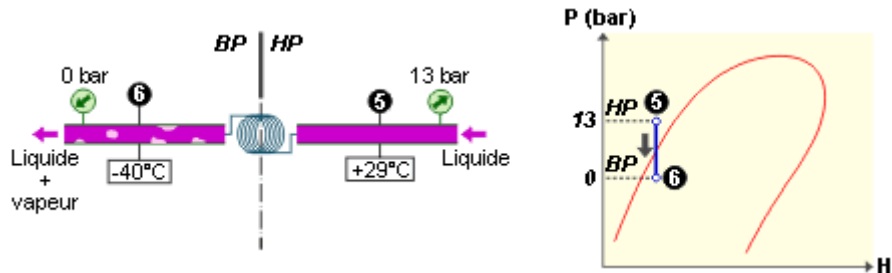


Fig 3.4 Fonctionnement du détendeur. [11]

Donc, au niveau du détendeur il reste à trouver le moyen de renvoyer le fluide frigorigène dans l'évaporateur pour qu'il permette à nouveau de refroidir le local. Il faut pour cela qu'il soit froid. Or, en sortie du condenseur, le fluide frigorigène est un liquide chaud. Pour le faire chuter en température, on effectue l'inverse d'une compression : **une détente**.

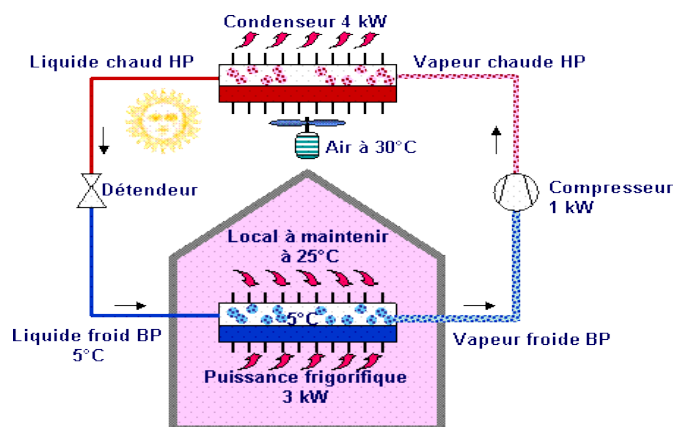
Le phénomène est moins connu que celui de la compression, mais nous l'avons tous rencontré. Lorsqu'un homme se rase le matin, ou qu'une femme se parfume, ils ont noté que la bombe de mousse à raser ou le vaporisateur de parfum se refroidissait. Ceci est dû à la chute de pression de la mousse ou du parfum qui se retrouve brusquement à la pression atmosphérique de la salle de bain.

Dans le circuit frigorifique, la chute de pression nécessaire au refroidissement du fluide frigorigène est obtenue par frottement (perte de charge) dans le détendeur. Il s'agit en général d'une sorte de robinet de petite taille.

### Question

**Q4:** Indiquez, aussi clairement et complètement que possible, toutes les différences que présente le fluide frigorigène entre l'entrée et la sortie du détendeur.

*Récapitulons :*



Le cheminement complet du fluide frigorigène s'appelle **le cycle frigorifique**.

### III.5 Fonctionnement complet

Le cycle est fermé, le fluide frigorigène évolue sous l'action du compresseur dans les quatre éléments constituant la machine frigorifique.

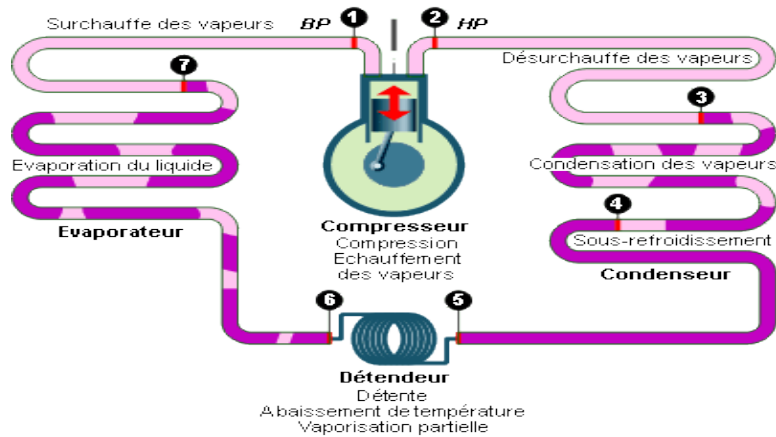


Fig 3.5 Cycle frigorifique élémentaire. [11]

L'ensemble du cycle peut être représenté dans le diagramme enthalpie-pression. Sous la courbe en cloche se situent les états de mélange liquide-vapeur; à gauche de la cloche, le fluide est à l'état liquide (il se "sous-refroidit"), à droite, le fluide est à l'état vapeur (il "surchauffe").

### III.6 Le fonctionnement de la machine frigorifique en équilibre permanent

Le cycle réel de fonctionnement d'une machine frigorifique se stabilise à partir des températures du milieu qu'il faut refroidir, de l'air extérieur où la chaleur est rejetée, et des caractéristiques dimensionnelles de l'appareil.

Ainsi, la température d'évaporation se stabilisera quelques degrés en dessous de la température du fluide refroidi par l'évaporateur. De même, la température de condensation se stabilisera quelques degrés au-dessus de la température du fluide de refroidissement du condenseur.

Or, les besoins de froid évoluent en permanence et la température extérieure varie toute l'année !

Tout cela va bien sûr entraîner une modification du taux de compression et une variation de la puissance absorbée. En fonction du régime d'évaporation et de condensation, le compresseur aspirera un débit masse plus ou moins grand de fluide frigorigène définissant ainsi la puissance frigorifique à l'évaporateur et calorifique au condenseur.

## Exemple

Afin d'imaginer ces évolutions, partons d'un cas concret.

## Évaporateur

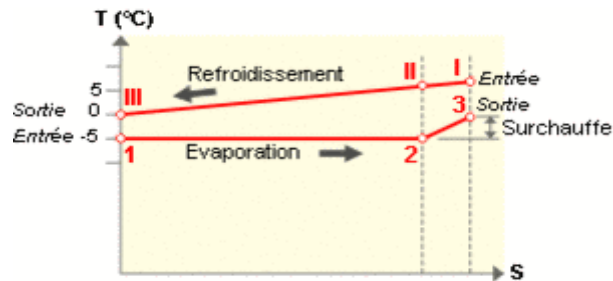


Fig 3.6 Evolution des fluides dans l'évaporateur.

Le meuble frigorifique fonctionne au régime 0 - 5 °C. L'échange de chaleur s'effectue en deux phases :

- ébullition du fluide;
- surchauffe des vapeurs.

La température d'évaporation qui s'établit est de - 5 °C. Dans le cas du R134a, ceci correspond à une basse pression de 1,4 bar (lecture du manomètre), soit 2,4 bar absolu (comparé au vide).

## Condenseur

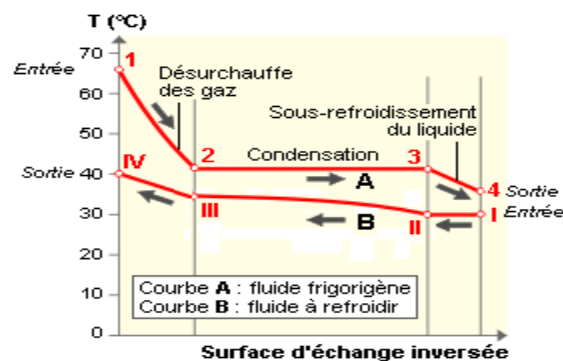


Fig 3.7 Evolution des fluides dans le condenseur.

Le condenseur est directement refroidi par l'air extérieur. Supposons que celui-ci entre à 30 °C dans le condenseur. L'échange de chaleur s'effectue en trois phases :

- désurchauffe des gaz chauds provenant du compresseur,
- condensation du fluide,
- sous-refroidissement du liquide.

La température de condensation qui s'établit est de 40 °C. Dans le cas du R 134a, ceci correspond à une haute pression de 9,1 bar, soit 10,1 bar absolu.

Analysons le comportement du compresseur sur base des caractéristiques nominales données par le fournisseur.

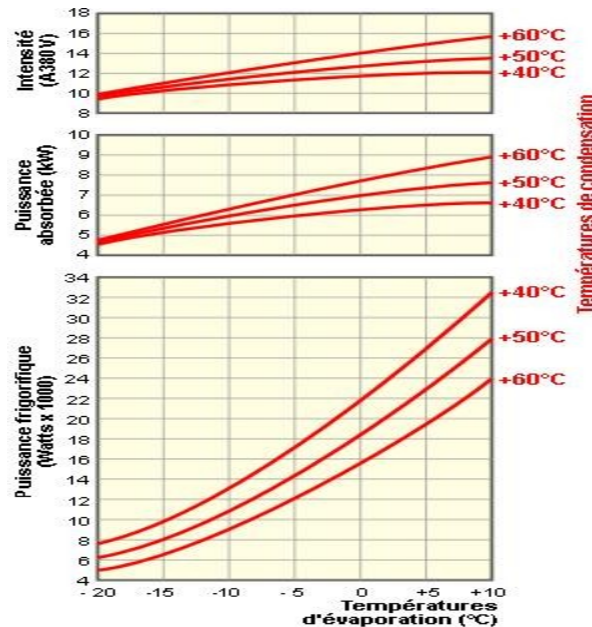


Fig 3.8 Extrait d'un catalogue de compresseurs.

On constate que pour une température d'évaporation de - 5 °C et pour une température de condensation de 40 °C,

- la puissance électrique absorbée par le compresseur sera de 6 kW,
- la puissance frigorifique donnée à l'évaporateur sera de 17 kW.

Remarque : en réalité, une adaptation de quelques pour cent devrait avoir lieu, car le constructeur fournit des indications pour un fonctionnement normalisé de son appareil (surchauffe de 0K, sous-refroidissement de 25 K selon DIN 8928 et bientôt la CEN) mais ceci dépasse la portée de ces propos.

Supposons à présent que le condenseur soit mal entretenu. L'échange de chaleur se fait moins bien, la température au condenseur augmente, le compresseur va travailler davantage et va augmenter la pression de sortie des gaz. Une nouvelle température de condensation va s'établir : supposons qu'elle atteigne une température de 50°C. Comme la température du liquide s'élève à l'entrée du détendeur, la température d'évaporation s'élève également de 1 ou 2°. Le diagramme constructeur prévoit une augmentation de la puissance électrique absorbée : 6,5 kW, pour une puissance frigorifique diminuée : 14,2 kW...

Le "rendement" de la machine s'est dégradé :

- **AVANT** : (17 kW produits) / (6 kW absorbés) = 2,8.
- **APRES** : (14,2 kW produits) / (6,5 kW absorbés) = 2,1.

On dira que "l'efficacité énergétique" de la machine frigorifique a diminué de 25 %. À noter que l'on serait arrivé au même résultat si la température extérieure s'était élevée de 10°.

### III .7 Les types des éléments de base du circuit frigorifique

#### III .7.1 Les différents types du compresseur

Il y a 4 types de compresseurs :

- **compresseur a piston**
- **compresseur à spirale**
- **compresseur à vis**
- **compresseur centrifuge**

##### III.7.1.1 Compresseur à piston

Ils équipent principalement les réfrigérateurs ménagers mais on peut aussi les rencontrer pour le **froid commercial** (faible et moyenne puissance) et pour les groupes de production d'eau glacée utilisée pour les centrales de traitements d'air. On peut les trouver dans les installations de froid industriel anciennes.

##### III.7.1.2 Compresseur à spirale (Scroll)

Aussi appelé compresseur scroll; ceux-ci équipent souvent les climatisations du fait de leur discrétion sonore. On les reconnaît à leur forme allongée. leur champs d'application est plutôt pour la climatisation (split-system, multi split,...). Ils peuvent aussi constituer une "centrale" pour assurer le fonctionnement de centrale de traitements d'air via un **fluide caloporteur** (plus généralement de l'eau pure ou glycol).

##### III.7.1.3 Compresseur à vis (Screw)

Le **compresseur à vis ou hélico-compresseur** appartient à la classe des **machines volumétriques de type rotatif**. Depuis 1976, on assiste à un développement important mondial des compresseurs à vis dans tous les **domaines du froid**. Depuis quelques années, il est apparue une nouvelle génération de compresseurs à vis de petite et

moyenne puissance recouvrant le domaine des compresseurs à pistons de moyenne puissance vus leur efficacités et leur progrès dans l'amélioration du rendement.

Les compresseurs à vis se répartissent en deux sous-groupes : **les birotors** et les **Mono rotors**.

#### III.7.1.4 Compresseurs centrifuge

Le compresseur centrifuge ou turbocompresseur est une turb-machine de type radial. Il comprend un rotor animé d'une vitesse de rotation uniforme. il est traversé par le fluide qui s'écoule d'une façon permanente. Vitesse de rotation uniforme et écoulement permanent sont les caractéristiques essentielles des turbo-machine. Le compresseur centrifuge utilise l'augmentation de l'énergie cinétique du fluide, obtenue en utilisant la force centrifuge provoquée par la grande vitesse périphérique avec laquelle le fluide quitte les aubes du rotor. A la sortie de la roue, le fluide pénètre dans un diffuseur où la vitesse du fluide est convertie en pression.

Description : Un **compresseur centrifuge** se compose d'un ensemble mobile constitué par un arbre et une roue à aubages, et d'un jeu d'aubages de prérotation placé à l'aspiration du compresseur.

### III.7.2 Les différents types d'évaporateur

#### III.7.2.1. Evaporateur à convection naturelle

On appelle **convection naturelle**, le mouvement résultant de la variation de la masse volumique du fluide avec la température, cette variation engendre la formation d'un champ de force gravitationnelle qui conditionne le déplacement des particules du fluide.

**Les évaporateurs à convection naturelle** sont généralement, réalisés en tube à ailettes et parfois en tubes lisses collés sur une plaque métallique. La réfrigération de l'aire est obtenue par convection naturelle de l'air qui se met en mouvement (l'air froid tombe vers le bas et l'air chaud va vers le haut). Ce procédé est réservé à de faibles puissances frigorifiques; exemple l'évaporateur du réfrigérateur.

#### III.7.2.2 Evaporateur convection forcée

On appelle **convection forcée**, le mouvement provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques ; c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide. L'échange de chaleur avec ventilation forcée consiste à forcer la circulation d'air sur l'évaporateur et ainsi améliorer l'échange thermique entre le fluide frigorigène et le corps à refroidir (air, eau...). Avec ce système, il est possible d'avoir de plus grosses puissances frigorifiques.

### III 7.3 Les différents types de condenseur

#### III 7.3.1 Condenseur à convection naturelle

Ce **type de condenseur** est réservé aux installations de très faible puissance (réfrigérateurs ménagers); il est constitué par un tube formant un serpentin appliqué sur une feuille de tôle formant ailette unique et perforée, le **condenseur** étant alors placé verticalement derrière le réfrigérateur.

#### III.7.3.2 Condenseur à convection forcée

Pour des **puissances frigorifiques supérieures** à celles des réfrigérateurs ménagers, il est recommandé d'utiliser des condenseurs à convection forcée afin que les appareils utilisés soient d'un encombrement compatible avec les puissances colorifiques à évacuer. Les condenseurs à convection forcée sont constitués par une batterie ailetée équipée d'un ou plusieurs électroventilateurs qui assurent la circulation de l'air sur le pinceau ailette, exemple le condenseur d'un climatiseur.

### III.7.4 Les différents types de détenteurs

#### III 7.4.1 Détendeur capillaire

Le **capillaire** est un tube en cuivre dont le diamètre est très faible (de l'ordre de 0.6mm à 1.8 mm) et la longueur varie de 1.7m et 7m environ. Il permet d'assurer la détente du fluide frigorigène et l'alimentation de l'évaporateur en fluide frigorigène détendu, il relie le condenseur avec l'évaporateur. **La détente du fluide frigorigène** est obtenue par une chute de pression lors de son passage dans le tube.

#### III.7.4.2 Les détendeurs thermostatiques

Il va réguler le débit qui circule en fonction d'une surchauffe. Un détendeur thermostatique à égalisation de pression interne: L'évaporateur crée de grosse pdc, mais on ne tient pas compte de ces pdc. Un détendeur thermostatique à égalisation de pression externe: L'évaporateur crée des pdc, la t° d'évaporation va chuter (-10° entrée, -8° sortie). Il faut que la surchauffe soit réglée en fonction des pdc. La sonde se trouve après le bulbe du détendeur. Quand le détendeur va faire son travail, la sonde va tenir compte des pdc occasionnées dans l'évaporateur.

#### III 7.4.3. Les détendeurs électroniques

C'est un détendeur électrique, on a une mesure avant et après l'évaporateur, en fonction des t°, il envoie la mesure à un régulateur. En fonction de l'écart de t° entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur avec la consigne. Il envoie un signal à une électrovanne (détendeur) qui ouvre ou ferme le circuit. Il ne mesure pas de surchauffe

## IV . Autre types de machines frigorifiques

### IV 4.1 La machine frigorifique à absorption

#### Objectif

Produire du froid et/ou du chaud à partir de l'énergie récupérée sur un effluent chaud.



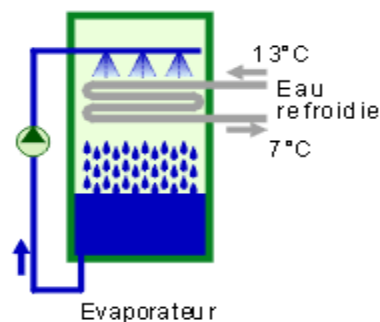
Fig 4.1 machine frigorifique à absorption [25]

La machine frigorifique à absorption se divise en quatre composants principaux :

- 1 **l'évaporateur,**
- 2 **l'absorbeur,**
- 3 **le concentrateur,**
- 4 **le condenseur.**

- 1 Dans l'**évaporateur**, le réfrigérant (ici de l'eau) est pulvérisé dans une ambiance à très faible pression. L'évaporateur est parcouru par un circuit à eau. En s'évaporant, le réfrigérant soustrait sa chaleur à cette eau qui est ainsi refroidie.

Une partie du réfrigérant pulvérisé ne s'évapore pas et tombe dans le fond de l'évaporateur où elle est pompée pour être à nouveau pulvérisée.



- : réfrigérant sous forme liquide
- : réfrigérant sous forme vapeur
- : solution absorbante diluée
- : solution absorbante concentrée

Fig 4.2 Evaporateur [25]

- La vapeur d'eau créée dans l'évaporateur est amenée à l'**absorbeur**. Il contient la solution absorbante (LiBr) qui est continuellement pompée dans le fond du récipient pour y être pulvérisée. Le LiBr absorbe la vapeur d'eau hors de l'évaporateur et y maintient ainsi la basse pression nécessaire à la vaporisation du réfrigérant.

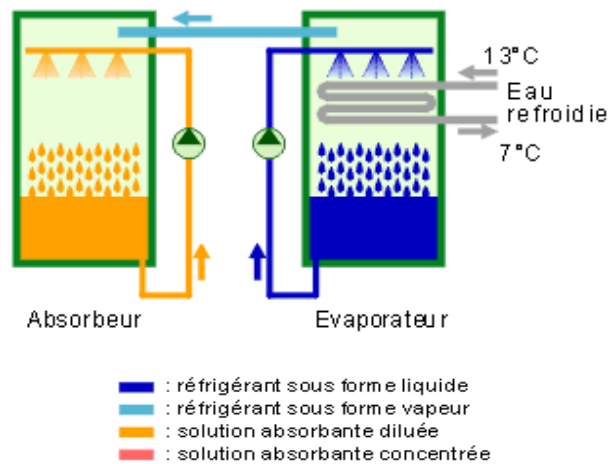


Fig 4.3 Evaporateur, Absorbeur [25]

Au fur et à mesure qu'elle absorbe la vapeur d'eau, la solution absorbante est de plus en plus diluée. Elle finirait par être saturée et ne plus rien pouvoir absorber.

- La solution est donc régénérée dans le **concentrateur**. Elle est réchauffée, par une batterie à eau chaude (environ 85°C) et une partie de l'eau s'évapore. La solution régénérée retourne à l'absorbeur.

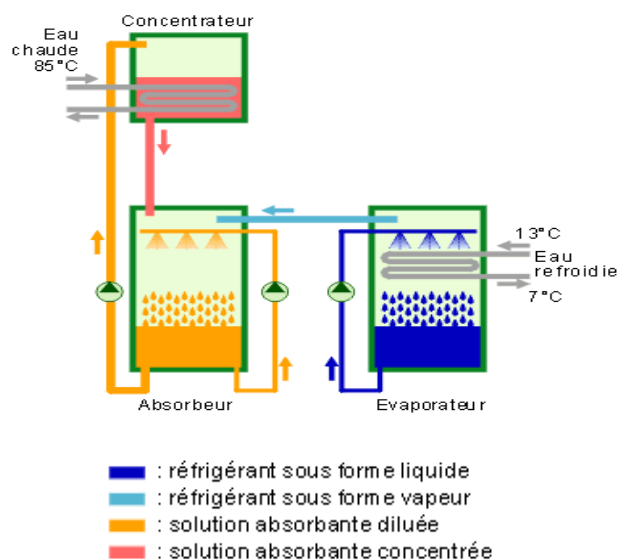


Fig 4.4 Concentrateur [25]

- Enfin, la vapeur d'eau extraite du concentrateur est amenée dans le **condenseur**, où elle est refroidie par une circulation d'eau froide. L'eau condensée retourne à l'évaporateur.

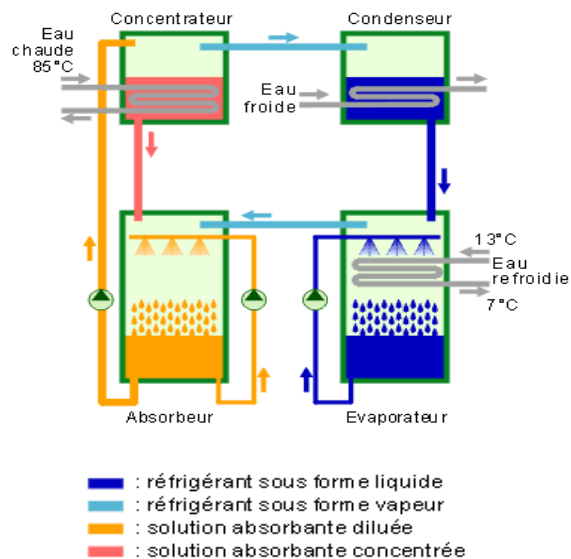


Fig 4.5 Condenseur [25]

Deux compléments au système augmentent son efficacité :

- Une circulation d'eau froide dans l'absorbeur. Le phénomène d'absorption génère de la chaleur. La circulation d'eau froide dans le fluide absorbant évite sa montée en température, ce qui diminuerait son efficacité.

*Remarque : l'eau de refroidissement de l'absorbeur peut ensuite passer dans la batterie de refroidissement du condenseur.*

- Un échangeur de chaleur sur le circuit du fluide absorbant. Le fluide chaud sortant du concentrateur qui retourne à l'absorbeur préchauffe le fluide qui va vers le concentrateur, économisant ainsi une partie de l'énergie nécessaire pour chauffer le fluide à régénérer.

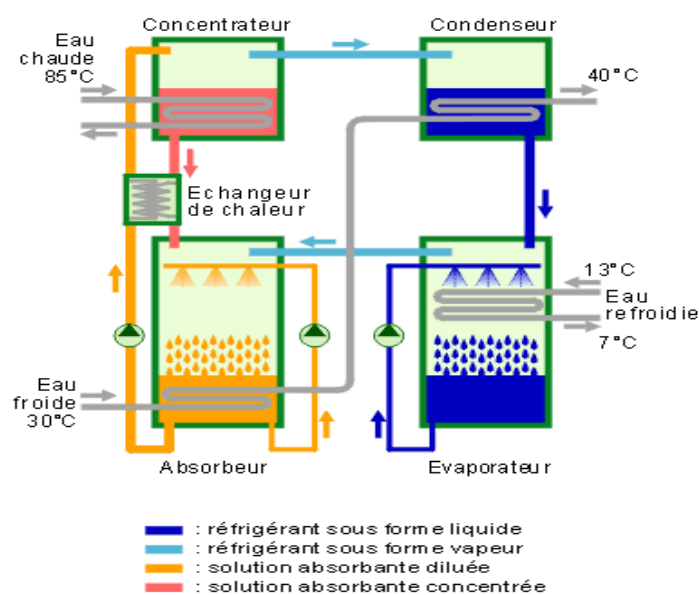


Fig 4.6 machine à absorption [25]

#### **IV 4.2 Le principe de fonctionnement d'une machine à absorption**

C'est le français Ferdinand Carré (cycle de Carré) qui breveta en 1859 la première machine à absorption.

L'adsorbant étant solide, il est impossible de l'amener au fur et à mesure vers la source de chaleur pour être régénéré.

La machine fonctionne donc de manière cyclique. Deux récipients servent, tour à tour, d'adsorbant et de désorbant. Dans la première période, le premier adsorbant est utilisé pour la production de froid, tandis que l'autre est parcouru par l'eau chaude, et ainsi régénéré. Dans la seconde période, lorsque le premier adsorbant est saturé, il est remplacé par le second pour la production de froid, et est alors lui-même régénéré.

Un cycle à absorption fonctionne par l'aptitude d'un fluide à être désorbé grâce à la chaleur. Le fluide est ensuite détendu générant le froid puis absorbé à nouveau. Ce fut la première technique adoptée pour fabriquer du froid industriel.

Dans les équipements ménagers elle est aujourd'hui surtout utilisée pour la réfrigération silencieuse des minibars et la réfrigération sans électricité.

Les cycles à absorption ont un coefficient de performance généralement moins élevé que les cycles à compression utilisés dans une climatisation ou une réfrigération. Cependant ils permettent de réutiliser les chaleurs fatales (chaleur de fin de cycle difficilement réutilisable) sans consommer plus d'énergie. Les cycles à absorption sont reconnus pour leur fiabilité et, donc particulièrement indiqués pour la cogénération.

Les cycles à absorption utilisent l'ammoniac comme frigorigène. Les avantages de ce fluide résident dans ses qualités thermodynamiques et dans son innocuité vis à vis de l'environnement. Il faut rappeler que l'ammoniac est un gaz organique présent partout dans la nature dans les substances vivantes en décomposition et, dans les déjections dont il fut extrait pour la première fois. Il compose le salpêtre.

Ces cycles fonctionnent avec un circuit scellé totalement étanche et des pompes à entraînement magnétique pour garantir la fiabilité inhérente à nos équipements pendant toute leur durée de vie soit 100 000 h.

Les refroidisseurs par absorption double étage utilisent comme source d'énergie la vapeur (pression pouvant atteindre 8 bars), l'eau chaude (jusqu'à 180°C), les gaz d'échappement, ou la chaleur dégagée par un compresseur, afin de produire de l'eau glacée destinée à des applications industrielles ou de confort. Cette énergie peut aussi être produite par des capteurs solaires à concentration.

Ces cycles à double étage améliorent l'efficacité thermodynamique et nécessitent moins d'énergie que les cycles à simple étage. Les unités à double étage sont adaptées aux sites à refroidisseur central disposant d'une source de vapeur ou d'eau chaude ainsi qu'à certaines applications de cogénération.

---

**Le principe de l'absorption est un procédé chimique basé sur la faculté qu'ont certains liquides à absorber et à désorber\* une vapeur.**

\*Processus inverse de l'adsorption

On utilisera deux composants l'un sera plus volatil étant porté à ébullition ce sera le fluide frigorigène, et l'autre sera appelé l'absorbant.

Les couples (mélange binaire) les plus utilisés sont :

- Eau+ bromure de lithium : l'eau étant le fluide frigorigène
- Ammoniac+eau : l'ammoniac étant le fluide frigorigène

Tout comme les machines thermodynamiques à compression les installations à absorptions possèdent les éléments essentiels d'un circuit frigorifique, condenseur, détendeur, évaporateur la seule différence c'est qu'ils possèdent en plus ce qu'on appelle un bouilleur ou désorbeur, et un absorbeur, éléments nécessaires aux réactions chimiques. L'avantage de ce type de machine frigorifique est qu'il n'y a que peu de pièces en mouvement, ce qui limite les causes de pannes, et son inconvénient principal est que son rendement est très inférieur aux machines à compression.

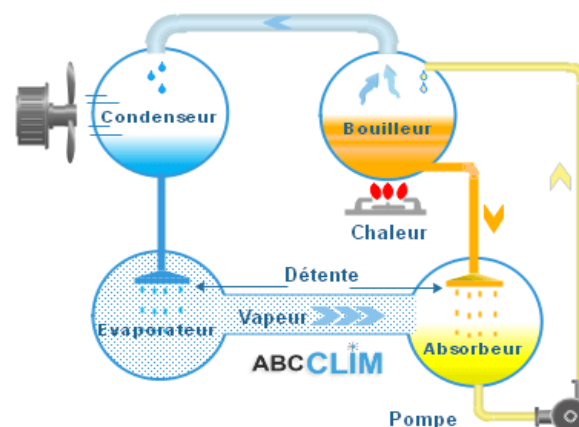


Fig 4.7 schéma simplifié d'une machine à absorption avec pompe [16]

## Fonctionnement

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

- Vaporisation à basse température
- Condensation à haute température.

Dans le bouilleur ou le désorbeur une solution riche en fluide frigorigène (exemple: eau) est portée à ébullition par une source de chaleur extérieure (résistances, brûleur à gaz, etc.) ce qui engendre une vaporisation du fluide. Le fluide frigorigène se sépare de l'absorbant.

Cette vapeur chemine vers le condenseur et cède sa chaleur au circuit de refroidissement (air,eau). Le liquide sous-refroidi se détend par abaissement brusque de la pression à travers le détendeur puis s'évapore dans l'évaporateur. Les vapeurs provenant de l'évaporateur vont dans l'absorbeur, elles rencontrent l'absorbant (exemple :bromure de lithium) qui par action hygroscopique permet une reconstitution du mélange riche en fluide frigorigène, cette solution est pompée pour que le cycle recommence.

## Principe

Dans un système par absorption, une source de chaleur est utilisée pour séparer un constituant volatil d'une solution, le plus souvent binaire. Ce constituant séparé sous phase vapeur est ensuite condensé, puis détendu. Le liquide issu de la détente s'évapore, absorbant ainsi de la chaleur et produisant du froid.

Les principaux éléments suivants sont nécessaires pour produire du froid selon un cycle à absorption :

- Un **générateur** : faisant office de "bouilleur", cet échangeur sert à séparer le fluide frigorigène de la solution grâce à un apport de chaleur (ici la chaleur fatale récupérée sur l'effluent);
- Un **condenseur** : cet échangeur sert à condenser la vapeur de fluide frigorigène issue du générateur ; le fluide de refroidissement servant à la condensation de cette vapeur sera en général de l'air ambiant;
- Un **évaporateur**: afin de produire l'effet frigorifique. Le niveau de température du liquide à refroidir (par exemple de l'eau entrant à 12 °C et sortant à 7 °C) fixe la température d'évaporation;
- Un **absorbeur**: servant à fixer la vapeur du fluide frigorigène dans le liquide absorbant (concentré en substance la moins volatile). La chaleur dégagée durant l'absorption devra également être évacuée, par exemple par de l'eau circulant ensuite dans un aéroréfrigérant.
- Une **pompe**: afin d'élever la pression du mélange et de la diriger vers le bouilleur.

2 solutions sont couramment employées :

- Eau/NH<sub>3</sub>, l'ammoniac servant de fluide frigorigène, l'eau d'absorbant. Les groupes à absorption Eau/NH<sub>3</sub> assurent la production de froid uniquement.
- Eau/LiBr, l'eau servant de fluide frigorigène, le bromure de lithium d'absorbant. Les groupes à absorption Eau/LiBr peuvent assurer la production d'eau glacée pour le refroidissement et/ou la production d'eau chaude au niveau du condenseur. L'offre de PAC à absorption actuelle permet d'atteindre des températures maximales de 90°C/100°C au condenseur.

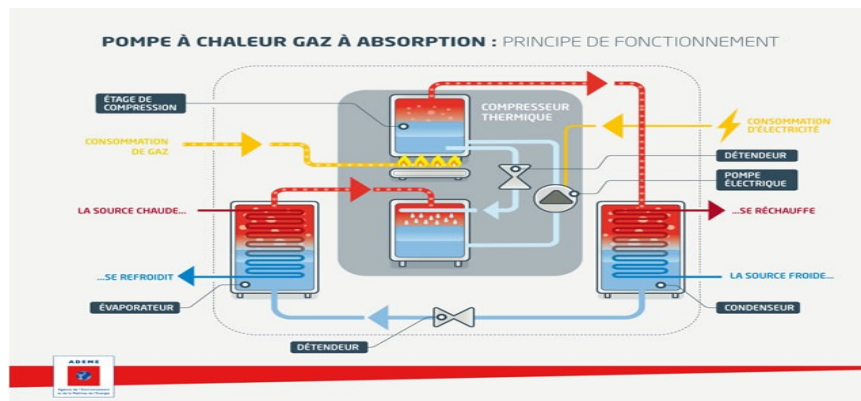


Fig 4.7 Machine à absorption à gaz

## Performances

Le choix des fluides utilisés conditionne les performances du cycle et ses conditions d'exploitation (pressions et matériaux en particulier).

Le mélange eau/ NH<sub>3</sub> permet d'atteindre des températures plus basses (le point d'ébullition du NH<sub>3</sub> est à - 33 °C). Dans le cas du mélange Eau/LiBr, l'effet frigorifique est procuré par l'évaporation de l'eau. Le point de congélation de l'eau (0 °C) limite donc l'application de ce mélange. Les performances de la machine sont caractérisées par le **COP** : ratio entre la puissance fournie au bouilleur et la puissance frigorifique délivrée à l'évaporateur. Celui-ci varie selon le type de fluide employé et les conditions d'utilisation (notamment la température de l'eau froide souhaitée). Les systèmes commercialisés ont généralement un COP variant entre 0,2 et 0,7 pour des machines à « simple effet d'absorption ».

## Avantages

- Machines fiables
- Absence de pièces mécaniques en mouvement (à l'exception des pompes)
- Très faible niveau sonore

## Inconvénients

- Investissement
- Rendement inférieur aux machines à compression
- Utilisation de fluide toxique et inflammable (NH<sub>3</sub>)

- Nécessité de travailler sous vide pour le mélange Eau/LiBr Applications

L'emploi d'une machine à absorption requiert la présence simultanée sur le site d'un effluent chaud (à une température minimum de 90 °C) d'une part, et d'autre part d'un besoin en froid positif ou négatif.

#### IV 4.2 Cycle frigorifique à air

Une machine frigorifique à air est schématisée ci-après Elle est destinée à maintenir dans la chambre « froide » une température  $T_1$ . La pression y est constante. Une masse de 1 kg d'air, prélevée dans la chambre « froide » à la température  $T_A = T_1$  est comprimée adiabatiquement. L'air passe ensuite dans un échangeur plongé dans une pièce dite chambre « chaude » dont la température  $T_2$ , supérieure à  $T_1$ , est considérée comme constante. L'air est ensuite détendu adiabatiquement et renvoyé, à la température  $T_D$ , dans la chambre « froide » où il va se réchauffer jusqu'à la température  $T_1$  considérée comme constante dans toute la chambre froide. Cette masse de 1 kg d'air subit donc un cycle, passant successivement par les états A, B, C et D. Précisons que la pression de l'air dans l'échangeur est constante et que sa température en C est celle de la chambre « chaude ». Par ailleurs, le travail fourni par le fluide au cours de sa détente est intégralement utilisé par le compresseur. On considère que l'air se comporte comme un gaz parfait et que les transformations sont réversibles.

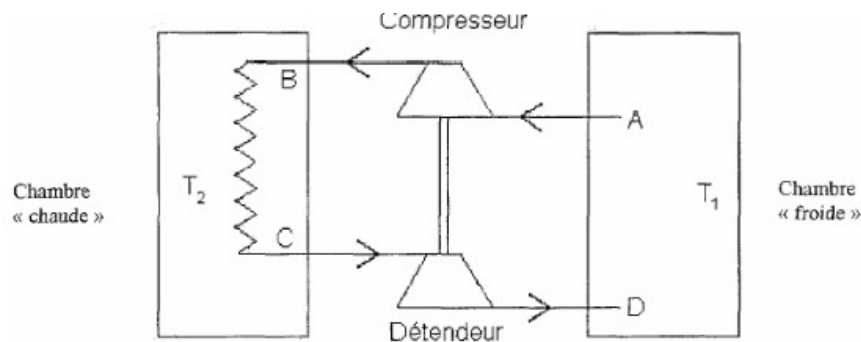


Fig 4.8 machine frigorifique à air [13]

Le cycle frigorifique à air est simplement un cycle de Joule inversé.

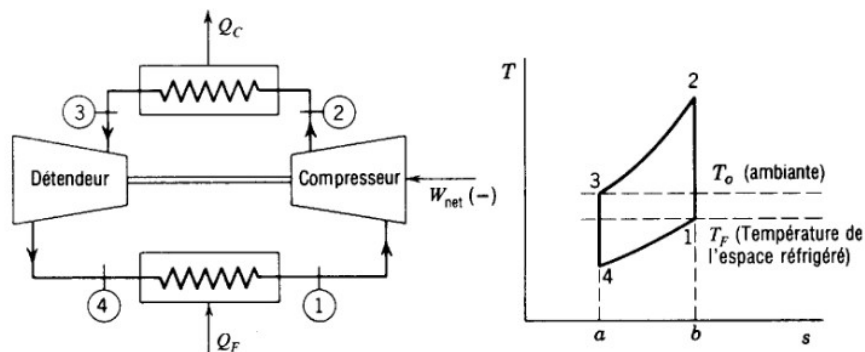


Fig 4.9 cycle frigorifique à air [13]

Contrairement au cycle à compression de vapeur, la puissance récupérable lors de la détente n'est pas négligeable, et l'on utilise donc une turbine (alors que la détente était effectuée par une vanne dans le cycle à compression de vapeur).

La production frigorifique nette  $PFN = h_1 - h_4 = c_p(T_1 - T_4)$ , alors que le travail massique requis vaut  $w = (h_2 - h_1) - (h_3 - h_4) = c_p[(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)]$ . Par conséquent, l'efficacité frigorifique (COP) vaut [13]

$$\varepsilon_{fr} = \frac{(T_1 - T_4)}{((T_2 - T_1) - (T_3 - T_4))} = \frac{1}{((T_2 - T_3 / T_1 - T_4) - 1)} = \frac{1}{((T_2 / T_1) - 1)} = \frac{1}{\dot{i}}$$

La production frigorifique volumétrique vaut :

$$PFV = \frac{C_p(T_1 - T_4)}{V_1} = \frac{C_p(T_1 - T_4)}{RT_1/P_1} = \frac{C_p P_1}{R} \left(1 - \frac{T_4}{T_1}\right) = \frac{C_p P_1}{R} \left(1 - \frac{T_3}{T_1} \Pi^{k - \frac{1}{k}}\right)$$

Pour des rapports de pression modérés, le COP diminue rapidement, et, en tenant compte du rendement des machines, il est encore réduit (environ d'un facteur 3). Ces machines frigorifiques ne sont donc pas compétitives avec les machines à compression de vapeur. Cependant, leur faible poids (dû à l'utilisation de turbomachines) est un avantage décisif pour le conditionnement d'air des avions.

On peut améliorer l'installation en utilisant un cycle de Joule inversé à récupération.

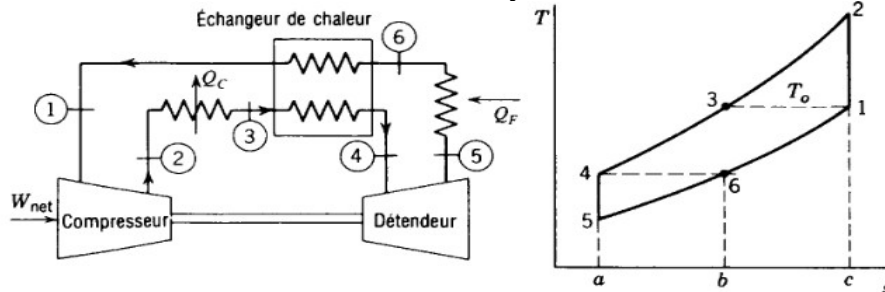


Fig 4.10 cycle frigorifique à air à récupération [13]

On peut ainsi atteindre aisément des températures très basses en un seul étage, ce qui rend la machine très compétitive. Ces machines sont très largement utilisées dans les installations à très basse température, notamment les liquéfacteurs. Le gaz utilisé n'est alors plus nécessairement de l'air. Il se pose toutefois des problèmes technologiques (matériaux, lubrification) en raison des basses températures auxquelles la turbine fonctionne. Les performances du cycle à récupération sont : [13]

$$PFN = C_p(T_6 - T_5) = (T_F - T_5)$$

$$w = C_p((T_2 - T_1) - (T_4 - T_5))$$

$$\varepsilon_{fr} = \frac{T_F - T_5}{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_5)} = \frac{1}{\left(\frac{T_2 - T_1}{T_F - T_5} - 1\right)} = \frac{1}{\left(\frac{T_2}{T_F} - 1\right)} = \frac{1}{\left(\frac{T_C}{T_F} \Pi^{k-\frac{1}{k}} - 1\right)}$$

$$PFV = \frac{C_p(T_6 - T_5)}{R T_1/P_1} = \frac{C_p P_1}{R} \left(\frac{T_F - T_6}{T_C}\right) = \frac{C_p P_1}{R} \frac{T_F}{T_C} (1 - \Pi^{k-\frac{1}{k}})$$

#### IV 4.2.1 Cycle de Joule inversé.

La puissance récupérable lors de la détente n'est pas négligeable → turbine (vanne dans le cycle à compression de vapeur)

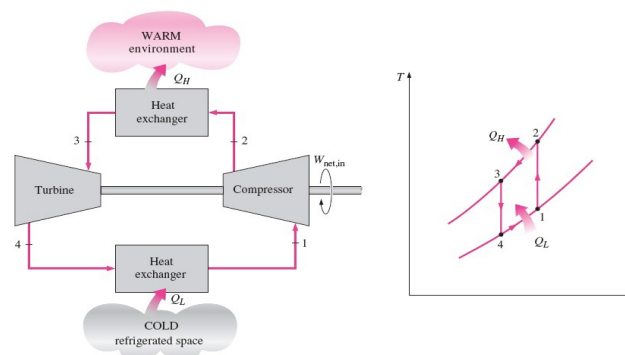


Fig 4.11 cycle de Joule inversé [14]

Analyse énergétique : [14]

- Echanges de chaleur isobare,  $q = \Delta h$
  - Compression, détente adiabatique,  $w = \Delta h$
  - Compresseur ( $q=0$ )  $w_c = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$
  - Source chaude ( $w=0$ )  $q_{SC} = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2)$
  - Turbine ( $q=0$ )  $w_t^* = h_3 - h_4 = c_p (T_3 - T_4)$
  - Source froide ( $w=0$ )  $PFN = q_{SF} = h_1 - h_4 = c_p (T_1 - T_4)$
- Production frigorifique nette (PFN)

- Efficacité thermique

$$\varepsilon_{fr} = COP = \frac{PFN}{w_c - w_t^*} = \frac{T_1 - T_4}{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)} = \frac{1}{\frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_4} - 1} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} - 1} = \frac{1}{\Pi^{k-\frac{1}{k}} - 1}$$

$$< \frac{1}{\frac{T_C}{T_F} - 1}$$

- Production frigorifique volumétrique (PFV)

$$PFV = \frac{c_p(T_1 - T_4)}{\frac{RT_1}{P_1}} = \frac{C_p P_1}{R} \left(1 - \frac{T_4}{T_1}\right) = \frac{C_p P_1}{R} \left(1 - \frac{T_3}{T_1} \Pi^{\frac{1-k}{k}}\right)$$

### Considérations générales

- Rapports de pression modérés → le COP diminue rapidement
- COP réduit ultérieurement (facteur 3) dans le cas réel
- Machines frigorifiques pas compétitives avec les machines à compression de vapeur
- Faible poids → conditionnement d'air des avions

#### IV 4.2.2 Cycle de Joule inverse à récupération (échangeur de chaleur)

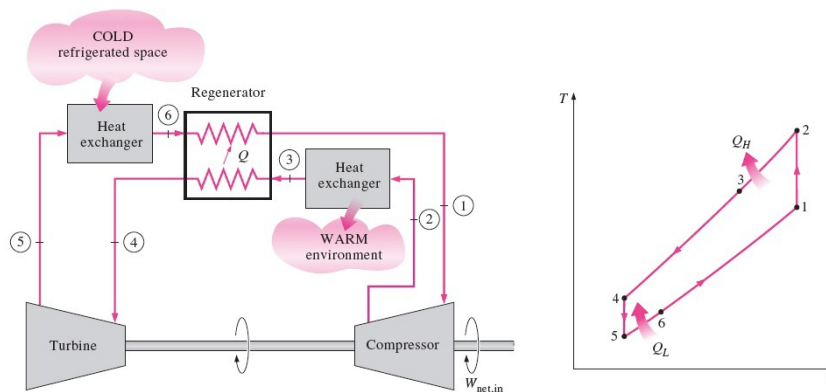


Fig 4.12 cycle de Joule inversé à récupération [14]

- Sans récupération

Plus basse température d'entrée en turbine =  $T_{\text{ambiant}}$ .

- Avec récupération

Température réduite à  $T_3$  avant l'expansion → température à la sortie de la turbine plus basse (température minimum du cycle).

- Températures très basses en un seul étage → très compétitive et utilisées dans les installations à très basse température (liquéfacteurs)

- Gaz utilisé → non nécessairement de l'air

#### Analyse énergétique [14]

- Compresseur ( $q=0$ )  $w_c = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$
- Source chaude ( $w=0$ )  $q_{SC} = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2)$
- Turbine ( $q=0$ )  $w_t^* = h_4 - h_5 = c_p (T_4 - T_5)$
- Production frigorifique nette (PFN)  $PFN = q_{SF} = h_6 - h_5 = c_p (T_6 - T_5)$
- Efficacité thermique

$$\epsilon_{fr} = \frac{T_6 - T_5}{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_5)} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_6} - 1} = \frac{1}{\frac{T_1}{T_6} \Pi^{\frac{k-1}{k}} - 1}$$

- Production frigorifique volumétrique (PFV) :

$$PFV = \frac{c_p (T_6 - T_5)}{\frac{RT_1}{P_1}} = \frac{C_p P_1}{R} \left( \frac{T_6 - T_5}{T_1} \right)$$

## V. Schéma fluidique d'une pompe à chaleur

### V.1.1 Le cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur

Le cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur c'est le chemin parcouru par le fluide frigorigène lors de son passage au niveau de tous les composants de la machine, subissant ainsi différentes phases liquide et gaz.

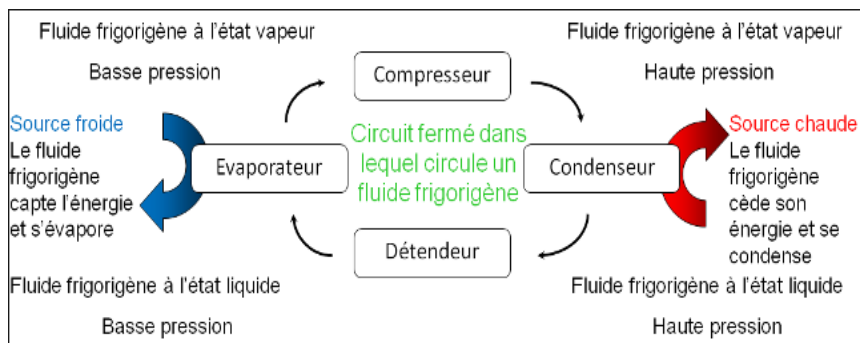


Fig 5.1 cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur

### V.1.2 Le schéma fluidique d'une pompe à chaleur

Le schéma fluidique d'une pompe à chaleur ce n'est rien d'autre que les différentes phases que subit le fluide frigorigène en traversant les quatre composantes de la pompe.

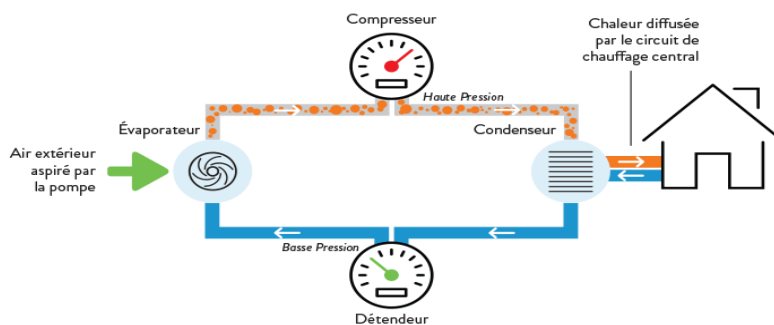


Fig 5.2 schéma fluidique d'une pompe à chaleur [16]

Le principe de la pompe à chaleur est de restituer au logement une énergie préalablement fournie par l'environnement extérieur. En ce qui concerne la PAC air/eau, la source de prélèvement de la chaleur, aussi appelée source froide, est l'air, tandis que la distribution de la chaleur à travers le logement sera réalisée par le biais de l'eau. Comme on peut l'observer sur le schéma ci-dessus, ce transfert d'énergie est effectué grâce à un fluide frigorigène qui traverse 4 organes principaux qui sont l'évaporateur, le **compresseur**, le **condenseur** et enfin le **détendeur**.

### V.1.3 Des schémas fluidiques détaillés d'une pompe à chaleur

Ces schémas nous montrent les sources des capteurs extérieurs et la destination des émetteurs intérieurs.

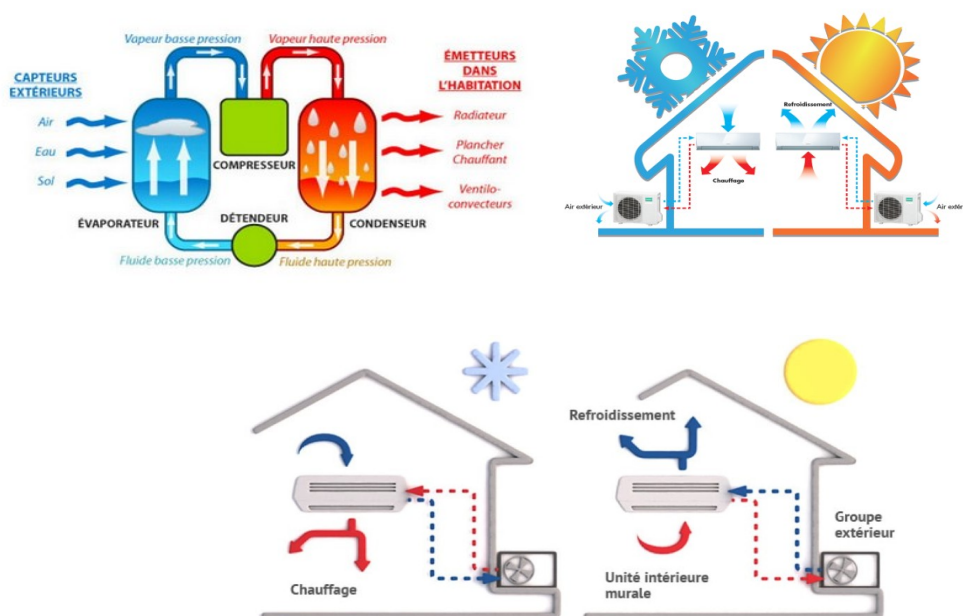


Fig 5.3 schémas fluidiques détaillés d'une pompe à chaleur [16]

## V.2 Vanne d'inversion du cycle

### V.2.1 définition de la vanne

La différence entre un climatiseur (froid seul) et une pompe à chaleur, c'est que la pompe à chaleur a la capacité de fonctionner en chaud comme en froid, l'élément déterminant pour obtenir ce fonctionnement c'est la vanne d'inversion de cycles. Il faut ajouter que la deuxième fonction de la vanne d'inversion de cycles ou vanne quatre voies est de permettre le dégivrage de la batterie extérieure en période hivernale (givre = perte de performance). Voici le positionnement de la vanne dans le circuit frigorifique.

Une vanne d'inversion de cycle (appelée aussi vanne 4 voies ou vanne à tiroir) permet de changer le sens de fonctionnement de la machine ou plus exactement d'inverser l'écoulement du fluide afin d'obtenir le passage du mode froid (été) au mode chaud (hiver) .

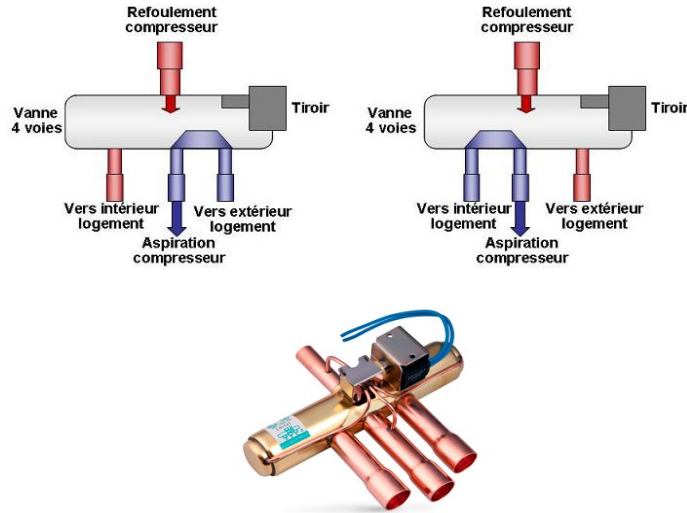


Fig 5.4 Schéma d'une vanne d'inversion de cycle [7]

L'avantage de ce type de matériel c'est bien d'assurer les besoins de chauffage ou de climatisation en un seul appareil, mais le principal atout c'est son coefficient de performance, qui est le rapport de l'énergie restituée sur l'énergie consommée.

$COP = \text{énergie restituée} / \text{énergie consommée}$

Exemple :  $COP = 9000W / 3000W = 3$

Le passage du fluide frigorigène dans la vanne est schématisé comme suit :

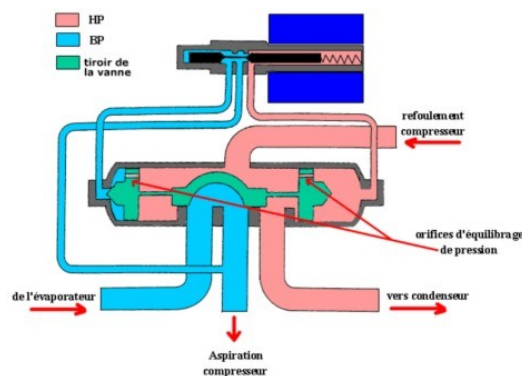


Fig 5.5 Cycle d'une vanne d'inversion de cycle [7]

Positionnement de la vanne d'inversion de cycle par rapport au compresseur :

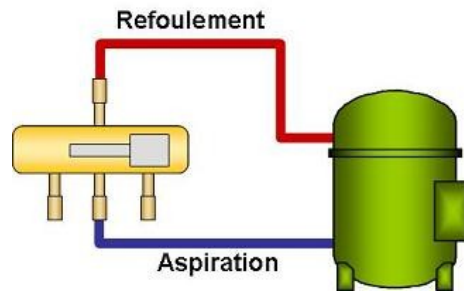


Fig 5.6 position de la vanne d'inversion de cycle [7]

### V.2.2 les composants de la vanne

Mode froid ou mode chaud ?

La vanne d'inversion de cycle ou vanne à 4 voies permet donc de changer le sens de fonctionnement ou plus exactement d'inverser l'écoulement du fluide afin d'obtenir l'effet souhaité.

La vanne 4 voies est, comme représenté ci-dessous, constituée d'une vanne principale (1) et d'une vanne pilote (2) montée sur le corps de la vanne principale. La vanne pilote est actionnée électriquement par une bobine qui permet à la vanne principale de faire coulisser un tiroir (4) qui inverse l'alimentation des tuyauteries. Remarquez que le refoulement (3) et l'aspiration (5) du compresseur sont raccordés à l'opposé l'un de l'autre.

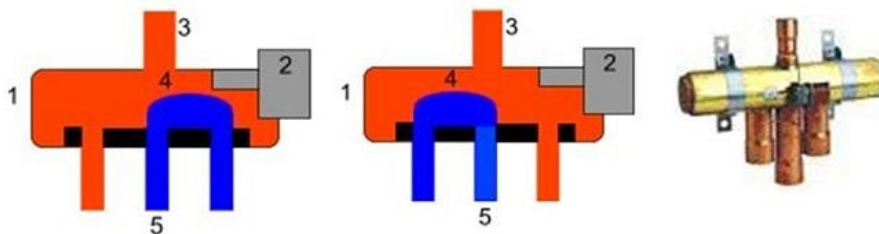


Fig 5.7 composants de la vanne d'inversion de cycle [7]

Sur la coupe de la vanne d'inversion de cycle ci-dessous, remarquez la vanne pilote (en bleu) avec les petits capillaires qui actionnent le tiroir de la vanne principale.

### V.2.3 Le circuit détaillé de la vanne

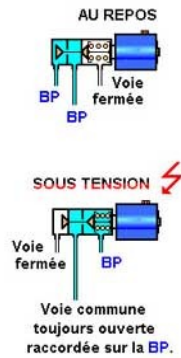


Fig 5.8 les états de la vanne d'inversion de cycle

Nous avons vu que les déplacements du tiroir ne pouvaient se produire que s'il existe une différence de pression entre la HP et la BP. L'électrovanne pilote à 3 voies ne sert qu'à faire chuter la pression sur l'une ou l'autre des extrémités de la vanne principale. C'est pourquoi cette électrovanne pilote, de très faible dimension, est exactement la même quel que soit le diamètre de la grosse vanne principale.

La voie centrale est la voie commune (qui n'est jamais fermée) et qui est raccordée sur la BP.

La bobine n'étant pas alimentée, la voie de droite est fermée et c'est la voie de gauche qui est mise en communication avec la BP. A l'inverse, quand la bobine est alimentée, la voie de droite est mise en communication avec la BP et c'est la voie de gauche qui se ferme.

Examinons maintenant un circuit frigorifique très simplifié équipé d'une V4V

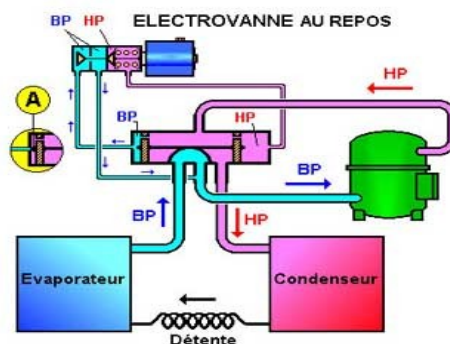


Fig 5.9 vanne d'inversion de cycle au repos [7]

La bobine de l'électrovanne pilote n'étant pas alimentée, sa voie de gauche ainsi que la partie gauche du tiroir sont mis en communication avec la BP (rappelons que le diamètre de l'orifice du piston est beaucoup plus petit que le diamètre des capillaires de liaison). C'est donc la BP qui règne à gauche du tiroir.

Puisque la HP règne sur la droite du tiroir, la différence de pression le repousse brutalement sur la gauche de la vanne principale.

Arrivé en butée gauche, le pointeau de piston (repère A) étrangle l'orifice de liaison du capillaire de sorte à interrompre le passage des gaz, devenu inutile. En effet, une fuite permanente entre la HP et la BP ne pourrait qu'avoir une influence néfaste sur le fonctionnement (voir panne du compresseur trop petit, aspect pratique, page 145). Notez que la pression va de nouveau s'équilibrer avec la HP à gauche du tiroir, mais la HP régnant également à droite, le tiroir ne pourra plus changer de position.

Notez bien l'emplacement du condenseur et de l'évaporateur, ainsi que le sens de passage du fluide dans le détendeur capillaire.

Maintenant, avant de tourner la page, essayez d'imaginer ce qui va se passer lorsqu'on va alimenter la bobine de l'électrovanne...bobine de l'électrovanne pilote n'étant pas alimentée, sa voie de gauche ainsi que la partie gauche du tiroir sont mis en communication avec la BP (rappelons que le diamètre de l'orifice du piston est beaucoup plus petit que le diamètre des capillaires de liaison). C'est donc la BP qui règne à gauche du tiroir.

Puisque la HP règne sur la droite du tiroir, la différence de pression le repousse brutalement sur la gauche de la vanne principale.

Arrivé en butée gauche, le pointeau de piston (repère A) étrangle l'orifice de liaison du capillaire de sorte à interrompre le passage des gaz, devenu inutile. En effet, une fuite permanente entre la HP et la BP ne pourrait qu'avoir une influence néfaste sur le fonctionnement (voir panne du compresseur trop petit, aspect pratique, page 145). Notez que la pression va de nouveau s'équilibrer avec la HP à gauche du tiroir, mais la HP régnant également à droite, le tiroir ne pourra plus changer de position.

Notez bien l'emplacement du condenseur et de l'évaporateur, ainsi que le sens de passage du fluide dans le détendeur capillaire.

Maintenant, avant de tourner la page, essayez d'imaginer ce qui va se passer lorsqu'on va alimenter la bobine de l'électrovanne...

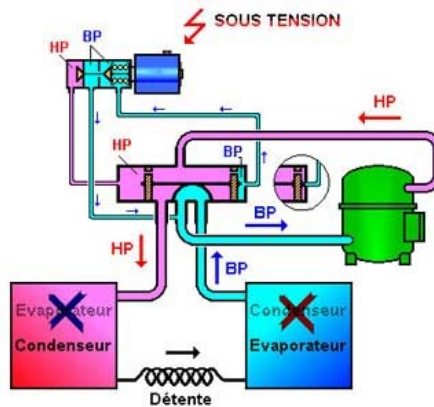


Fig 5.10 vanne d'inversion de cycle sous tension

En alimentant la bobine de l'électrovanne, on met en communication la partie droite du tiroir avec la BP, et le tiroir se déplace brutalement vers la droite. Arrivé en butée, le pointeau de piston interrompt la fuite de gaz en étranglant l'orifice de liaison du capillaire. Le tiroir s'étant déplacé, le refoulement est maintenant dirigé sur l'ancien évaporateur, devenu condenseur. De même, le compresseur aspire dans l'ancien condenseur, devenu évaporateur. Notez que le fluide frigorigène traverse maintenant le capillaire dans l'autre sens.

Pour éviter toute confusion, chaque batterie étant tour à tour évaporateur ou condenseur, on préfère les nommer batterie extérieure (pour l'échangeur situé en dehors des locaux) et batterie intérieure (pour l'échangeur situé à l'intérieur des locaux).

Le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur est basé sur un phénomène physique "le changement d'état". Quand un fluide frigorigène change d'état, par exemple s'il s'évapore pour devenir un gaz, il absorbera alors de l'énergie, et s'il se condense pour redevenir un liquide, il dégagera alors de l'énergie.

La température d'évaporation d'un fluide frigorigène étant plus basse que la température de l'air extérieur (aérothermie) ou du sol ou d'une nappe d'eau souterraine (géothermie) celui-ci absorbera les calories pour les restituées ensuite dans la phase de condensation.

Ce transfert thermique est assuré par un compresseur qui aspire, comprime et élève la température du fluide, puis le dirige vers le condenseur, celui-ci permet le premier changement d'état gaz /liquide par échange avec de l'air directement ou de l'eau d'un circuit de chauffage. Le liquide est détendu par la suite par abaissement brusque de la pression à travers le détendeur puis par échange avec l'air, de l'eau, ou la terre il s'évapore c'est le deuxième changement d'état et ainsi de suite.

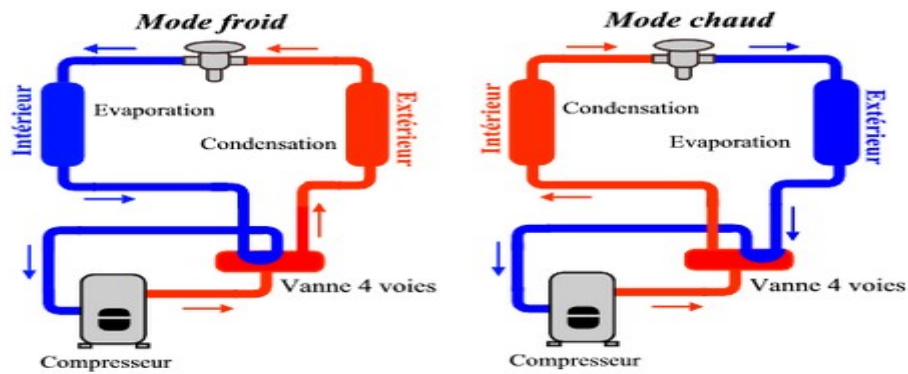


Fig 5.11 les deux modes d'une PAC

### V 3 Etude des performances (saison été et saison hiver)

La pompe à chaleur (PAC) se distingue des autres systèmes de production de chaleur par son coefficient de performance ( COP ). Effectivement, le principe est de récupérer un maximum de chaleur à l'environnement afin de réduire les consommations d'énergie.

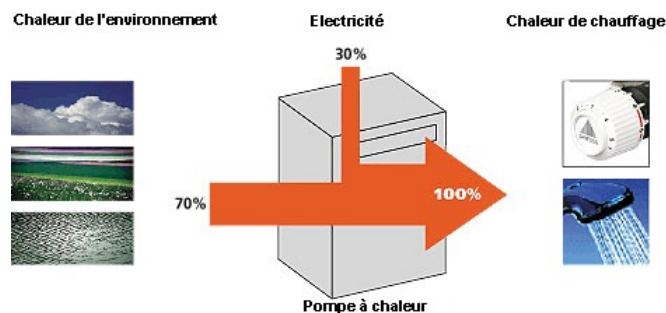


Fig 5.12 consommation énergétique d'une PAC

$$\text{COP} = \frac{\text{energie utile}}{\text{Energie consommée}} = \frac{100\%}{30\%} = 3.3$$

$$\text{COP} = \frac{\text{energie transférée par la PAC (chaleur restituée dans le bâtiment)}}{\text{Energie consommée pour réaliser le transfert (compresseur et auxiliaires)}}$$

Pour atteindre de telles performances, nous faisons appel à un système dit "thermodynamique".

En quelques mots, nous allons utiliser un fluide qui a la particularité d'absorber et de restituer beaucoup de chaleur lors de ses changements d'état.

#### V3.1 Détermination des performances

##### V 3.1.1 En chauffage (saison hiver)

En mode chauffage, la pompe à chaleur est définie par les caractéristiques suivantes :

- Puissance thermique dissipée au condenseur
- Puissance électrique totale absorbée en fonction de la température extérieure.

Elle comprend :

- la puissance électrique du compresseur,
- la puissance électrique du ou des ventilateurs,
- la puissance électrique de la pompe de circulation.

Le COP réel est le rapport quantité de chaleur évacuée au condenseur / quantité d'énergie totale absorbée par l'installation thermodynamique.

Il représente la quantité de chaleur récupérable au niveau du condenseur par rapport à la quantité d'énergie réellement consommée par la machine.

C'est un élément de comparaison du niveau de performance des différents systèmes.

Exemples pour une PAC air/eau Les seuils de coefficient de performance machine doivent être au moins égaux à:

3,3 pour le point d'essai 7 °C / 6 °C, + 35 °C

2,0 pour le point d'essai -7 °C / -8 °C, + 35 °C

### V 3.1.2 En rafraîchissement ou climatisation (saison été)

En mode rafraîchissement, la pompe à chaleur fonctionne en machine frigorifique. Elle est définie par les caractéristiques suivantes :

$$\epsilon_f = \frac{\Phi_{\text{frigorifique}}}{P_{\text{Totale}}}$$

La performance d'une pompe à chaleur s'exprime par le coefficient de performance (COP). Le COP est défini comme étant le rapport entre la quantité d'énergie transférée par la PAC (chaleur restituée dans le bâtiment) et l'énergie consommée pour réaliser ce transfert (énergie utilisée pour faire fonctionner le compresseur et certains auxiliaires). Le COP est un nombre sans dimension. Par exemple, une PAC qui produit 3 kWh de chaleur pour une consommation de 1 kWh électrique, a un COP égal à 3. Plus le COP est élevé, plus la pompe à chaleur est performante.

### COP d'une pompe à chaleur

Le COP d'un type de pompe à chaleur ( $\text{COP}_{\text{PAC}}$ ), qui est présenté dans les catalogues des fabricants, est défini pour des températures d'essais déterminées ( $T^\circ$  de la source froide et  $T^\circ$  de la source chaude). Les pompes à chaleur sont testées suivant la

méthodologie définie dans la norme EN 14511. Ces tests sont réalisés par des centres de test indépendants.

De manière générale, le COP d'une pompe à chaleur est d'autant plus élevé que la température de la source froide est élevée et que la température de la source chaude est petite. A titre d'exemple, le graphique ci-dessous illustre l'évolution du COP d'une PAC eau<sub>glycolée</sub>/eau, pour deux températures d'eau (source chaude), en fonction de la température de l'eau glycolée (source froide). La variation des températures ( $T^\circ$  source froide et  $T^\circ$  source chaude) durant une saison de chauffe a une influence sur la performance de la pompe à chaleur définie pour une saison de chauffe (voir COP saisonnier). Par rapport à la performance de cette même pompe à chaleur définie pour un point de fonctionnement spécifique ( $COP_{PAC}$ ) le COP saisonnier sera plus faible.

Exemple d'évolution du COP pour une pompe à chaleur eau<sub>glycolée</sub>/eau en fonction de la température de la source froide (eau glycolée) et de la température de la source chaude (eau)

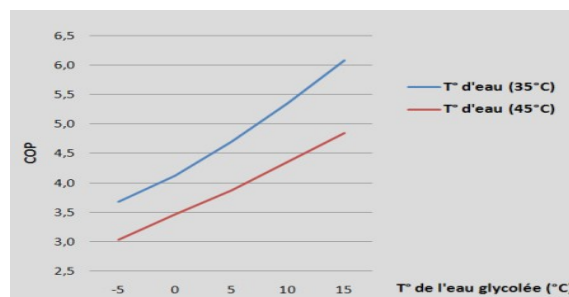


Fig 5.13 évolution du COP en fonction de la  $T^\circ$

### COP d'une installation

Dans la pratique, le COP d'une installation de chauffage par pompe à chaleur ( $COP_{INS}$ ) sera moins élevé que le COP donné dans le catalogue des fabricants ( $COP_{PAC}$ ). Cela est lié aux pertes thermique (échangeurs, canalisations,...), aux auxiliaires utilisés en fonction de la source froide exploitée (pompe, circulateur, ventilation,...) ainsi qu' à la mise en œuvre de l'installation (dimensionnement, pose,...).

### COP saisonnier

Sur une saison de chauffe, les températures de la source froide et de la source chaude varient en fonction, respectivement, du mode de captage et du mode de chauffage

utilisés. Le COP d'une installation de chauffage par pompe à chaleur ( $COP_{INS}$ ) comme défini ci-dessus, n'est donc pas suffisant pour déterminer l'efficacité "réelle" de cette installation.

Pour exprimer la performance d'une installation "pompe à chaleur" sur une saison de chauffe, on parle de COP saisonnier ( $COP_{SAIS}$ ) qui est le rapport entre, d'une part, les valeurs mesurées sur une saison de chauffe de l'énergie calorifique restituée dans le bâtiment et, d'autre part, de l'énergie consommée pour le fonctionnement de l'installation (pompe à chaleur + auxiliaires).

De manière théorique, la performance d'une installation "pompe à chaleur" sur une saison de chauffe peut être estimée par le facteur de performance saisonnier "SPF" (Seasonal Performance Factor) tel que défini dans les normes EN 15450 et EN 15316-4-2.

En fonction de différents paramètres (Type de PAC utilisée, qualité du dimensionnement, qualité de l'installation, type de bâtiment,...) le COP saisonnier des pompes à chaleur destinées au chauffage des bâtiments varie en moyenne entre 2,8 et 3,5 pour les pompes à chaleur aérothermiques et entre 3 et 4,5 pour les pompes à chaleur géothermiques et hydrothermiques.

### COP "frigo"

La performance d'une pompe à chaleur réversible est exprimée par son coefficient de performance (COP) en mode "chauffage". Par contre, en mode "rafraîchissement" elle est exprimée par son coefficient d'efficacité frigorifique (EER). Ce coefficient est égal au rapport entre l'énergie thermique prélevée au niveau l'évaporateur et l'énergie utilisée pour faire fonctionner la pompe à chaleur.

$$EER = \frac{\text{Energie transférée par la PAC (chaleur prélevée dans le bâtiment)}}{\text{Energie consommée pour réaliser le transfert}}$$

## **V3.1.3 Les différents coefficients de performance des pompes à chaleur**

### **V 3.1.3.1 Le COP du groupe moto-compresseur**

Ce COP s'écrit  $\epsilon_c$  et on l'appelle "indice de performance". C'est le rapport de la puissance thermique utile délivrée au condenseur à la puissance électrique absorbée par le compresseur uniquement. Cet indice est variable en fonction des températures

des sources chaude et froide. Quand on précise une valeur de  $\epsilon_c$ , on doit donc indiquer les basses de température et spécifier s'il s'agit de sources extérieures ou intérieures.

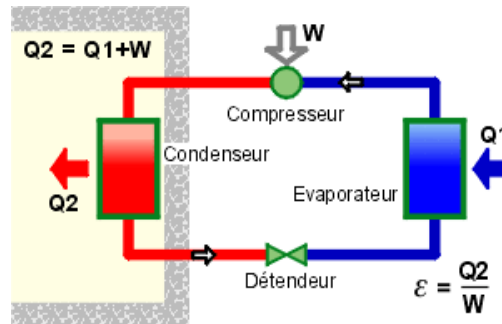


Fig 5.14 le cycle thermodynamique

$\epsilon_c = \text{chaleur au condenseur/travail du compresseur} = Q2 / W$ .

*Par exemple, si, à un moment de mesure donné, les températures des sources chaudes et froides d'une certaine PAC sont telles qu'elle transmet via son condenseur une puissance de 3 kW alors qu'au même moment son compresseur requiert une puissance de 1 kW, on pourra dire que son indice de performance vaut  $3 \text{ kW} / 1 \text{ kW} = 3$  pour ces conditions de température.*

$\epsilon_c$  est obtenu après essais thermiques dans des conditions standard et il intègre donc les imperfections thermodynamiques (les écarts de température à l'évaporateur et au condenseur). Les pertes thermodynamiques, mécaniques, électriques du compresseur ont également été prises en compte.

L'indice de performance n'intègre par contre pas la consommation des auxiliaires (permanents ou non) et les pertes de chaleur dans les conduits.

### V 3.1.3.2 Le COP global de la PAC

C'est le COP qui est donné par les constructeurs de pompes à chaleur. Pour le calculer, en plus de la puissance du compresseur, on devra prendre en compte la puissance des auxiliaires non permanents (dispositif antigel, pompes et ventilateurs régulés en même temps que le compresseur, etc). La puissance consommée aux auxiliaires permanents (pompes de circulation dans le plancher, tableau électrique, régulation et système de sécurité) n'est pas assimilée.

$$\text{COP} = \frac{\text{Puissance thermique au condenseur (chaleur restituée dans le bâtiment)}}{\text{Puissance absorbée pour réaliser le transfert de chaleur (compresseur et auxiliaires NP)}}$$

Les mesures ne concernent que les éléments rattachés à la pompe à chaleur et sont indépendantes de l'installation de chauffage, de l'accumulateur, etc. La norme européenne EN 14511 fixe des conditions de mesures standardisées très précises qui ne correspondent aux situations réelles que dans certaines circonstances. Il ne faut pas perdre cela de vue lorsque l'on travaille avec ce COP.

Reprenons l'exemple de PAC ci-dessus. Dans les conditions imposées par la norme EN 255, la puissance mise à disposition au condenseur ne sera peut-être pas 3 kW mais 3,2 kW pour une température de sortie du condenseur identique. De plus, la puissance absorbée par l'ensemble des équipements à prendre en compte ne sera peut-être pas de 1 kW mais de 1,1 kW. Le coefficient de performance vaudra alors  $3,2 / 1,1 = 2,9$ .

Le COP est le coefficient le plus utile car il donne des performances réelles d'une pompe à chaleur. De même que pour l'indice de performance, il n'intègre pas les pertes dans les conduits.

#### **V 3.1.3.3 Le COP global de l'installation**

Ce COP, que l'on peut écrire  $\varepsilon_i$ , sera toujours inférieur au COP global de la PAC vu ci-dessus. Il tient compte des éléments suivants :

- les imperfections de l'installation (pertes d'énergie par les réseaux de distribution, pertes aux échangeurs, etc.) qui ne participent pas au chauffage des locaux,
- les auxiliaires (pompes, circulateurs, ventilation, etc.),
- la mise en œuvre de l'installation (dimensionnement, pose, etc.).

Si l'installation était parfaite,  $\varepsilon_i$  serait égal au COP global de la PAC donné par les constructeurs.

#### **V 3.1.3.4 Le COP saisonnier ou global annuel de l'installation**

Le cop saisonnier ou global annuel de l'installation

Le coefficient annuel, ou COPA, évalue la performance annuelle de l'installation de la pompe à chaleur, auxiliaires compris. C'est l'indice le plus important dans l'examen d'une installation de pompe à chaleur. Toutes les quantités d'énergie produite et injectées pendant une année y sont comparées. Il ne s'agit pas d'une valeur théorique calculée à partir de puissance installées, mais d'une mesure réelle sur site de la quantité d'énergie consommée et fournie. C'est le coefficient de performance annuel qui donne vraiment idée du "rendement" et de l'efficacité de l'installation.

Il vaut le rapport des valeurs mesurées :

$$COPA = \frac{\text{Énergie calorifique restituée dans le bâtiment sur une saison de chauffe}}{\text{Énergie consommée pour le fonctionnement de l'installation (pompe à chaleur + auxiliaires)}}$$

Imaginons que notre PAC fasse maintenant partie de toute une installation de chauffage. Les variations de température des sources froides et chaudes, les pertes par émission du réseau de distribution, la consommation d'un chauffage d'appoint, etc... font que 13 000 kWh\* de chaleur sont produits sur une année, tandis que les consommations globales s'élèvent à 6 200 kWh\* d'énergie électrique. On dira alors que le COPA de cette installation vaut 13 000 kWh / 6 000 kWh = 2,17.

Ces valeurs ne servent qu'à illustrer la définition du COPA. Il ne s'agit pas d'une quelconque moyenne d'installations existantes ou du résultat d'une étude de cas.

### **V 3.1.3.5 Le facteur de performance saisonnier SPF**

Le SPF évalue théoriquement la performance annuelle de la pompe à chaleur (et pas de l'installation). Il est le rapport des quantités d'énergie fournies et apportées en un an calculées de façon théorique sur base du COP instantané à différentes températures.

Il s'agit donc bien d'une valeur théorique mais prenant en compte les variations de température de la source froide et non pas d'une valeur mesurée en situation réelle comme le COPA. De plus, le SPF décrit une PAC tandis que le COPA décrit une installation complète. On ne tiendra donc pas compte pour le calcul du SPF des pertes de l'accumulateur par exemple, ou d'un mauvais réglage d'un dispositif de dégivrage, qui augmenteraient la quantité d'énergie demandée au compresseur et donnerait une valeur finale moins avantageuse mais plus réelle. On calculera le SPF comme ceci :

$$SEP = \frac{Q_{demandée}}{\frac{P(T_{ext})t(T_{ext})}{COP(T_{ext})}}$$

- $Q_{demandée}$  est la quantité d'énergie demandée à la PAC durant la période de chauffe [kWh/an].
- $P(T_{ext})$  est la puissance à apporter lorsque la température de la source froide est  $T_{ext}$  (par exemple les déperditions thermiques d'une maison selon la température extérieure) [kW].
- $t(T_{ext})$  est le temps durant lequel la température de la source froide est  $T_{ext}$  [h/an]
- $COP(T_{ext})$  est le coefficient de performance de la pompe à chaleur lorsque la température de la source froide est  $T_{ext}$ .

## V.4 Les différents types de pompes à chaleur

### V.4.1 Définition et généralités d'une pompe à chaleur (PAC)

La PAC est un système de transmission de chaleur utilisant un cycle frigorifique entraîné par un compresseur électrique.

Inversement au frigo, qui puise les calories de son volume intérieur et les transfère vers l'extérieur, la PAC puise des calories dans une source naturelle (air, eau, sol) et les transfère vers un volume à chauffer. Le but du frigo est de refroidir alors que celui de la pompe à chaleur est de réchauffer.

Les différents types de pompes à chaleur

Il existe plusieurs technologies de pompes à chaleur, les plus courantes sont actuellement les PAC à compression .

Une autre technologie de pompes à chaleur se développe depuis quelques années : la Pac à absorption gaz.

La PAC à compression, son compresseur peut être alimenté soit par de l'électricité (Pac à compression électrique) soit par du gaz (Pac à moteur gaz).le fonctionnement d'une Pac à compression est comparable à celui d'un réfrigérateur ménager.

La PAC à absorption dans le cas de ces PAC , l'élévation de température et de pression ne se fait pas via un compresseur mais par l'intermédiaire d'un brûleur à gaz. les échanges de chaleur reposent, quant à eux, sur la réaction d'une solution composée d'un fluide frigorigène (ammoniac) et d'un absorbant (eau).

La pompe à chaleur électrique ne produit donc pas de chaleur mais **la transfère d'une source froide vers une source chaude** grâce à un **travail de compression** alimenté par de l'électricité.

#### V.4.1.1 Fonctionnement de la PAC

La pompe à chaleur électrique transfère plus d'énergie qu'elle n'en consomme. L'électricité entraîne un compresseur pour transférer de l'énergie de la source naturelle et un travail mécanique vers l'ambiance à chauffer.

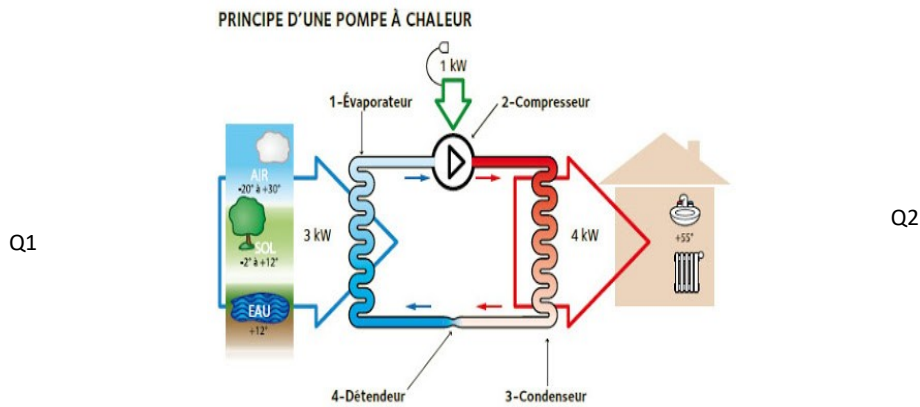


Fig 5.15 Cycle thermodynamique d'une PAC

$Q_1$  = Source froide = source naturelle

$Q_2$  = Source chaude = local à chauffer

$\epsilon_c$  = Efficacité du transfert thermique =  $Q_2/W$

L'électricité fournie se mue en énergie mécanique. Comme présenté ci-dessus, la chaleur transférée à la source chaude est la somme de l'énergie captée à la source froide et de l'énergie mécanique. On en retire un coefficient de performance :  $Q_2/W$ .

Les pompes à chaleur électriques peuvent fonctionner de manière tout ou rien. Cela signifie que cette pompe à chaleur est soit à l'arrêt soit en fonctionnement à pleine puissance. Bien que bon marché, le fonctionnement tout ou rien s'adapte mal à des conditions de demande thermiques différentes. Ce mode ON/OFF cause des phénomènes de marche-arrêt intempestifs (surtout en mi-saison) qui réduisent l'efficacité et la durée de vie de la machine. Ce phénomène peut être limité par la mise en place d'un stockage énergétique.

Actuellement, les pompes à chaleur ont évolué vers des **fonctionnements modulants**, plus efficaces et plus flexibles. Cette modulation se fait soit **par variation de la capacité volumétrique du compresseur** soit **par variation de l'intensité et de la fréquence du courant entraînant le compresseur** soit par **combinaison** de ces deux principes.

En fonction de la puissance et des critères d'utilisation demandés, il existe une multitude de compresseurs électriques. Ces informations sont reprises dans la rubrique du site sur les compresseurs.

De nombreux modes d'utilisation existent pour les pompes à chaleur à entraînement électrique. Vous trouverez des informations les concernant dans la rubrique Généralités.

#### **V.4.2 Les types de Pompes à chaleur**

Donc, la terminologie des pompes à chaleur les pompes sont souvent qualifiées par deux mots, le premier désigne le milieu où la pompe puise la chaleur, le second désigne le vecteur de diffusion dans le bâtiment.

Géothermie , Aquathermie et Aérothermie: sol/eau/air :

1/ Energie puisée dans le sol, diffusée dans des radiateurs à eau• sol/sol : énergie puisée dans le sol, diffusée dans un plancher chauffant• eau glycolée/eau : énergie puisée dans le sol via des capteurs enterrés contenant de l'eau glycolée, diffusée dans des radiateurs à eau• eau/eau .

2/ Energie puisée dans l'eau, diffusée dans des radiateurs à eau .

3/ Aérothermie : air/eau : énergie puisée dans l'air, diffusée dans des radiateurs à eau• air/air : énergie puisée dans l'air, diffusée via des ventilo-convecteurs

##### **V.4.2.1 Les PAC géothermiques**

Ces PAC utilisent la chaleur contenue dans le sol la chaleur est puisée dans le sol par des capteurs qui peuvent être enterrés, verticalement ou horizontalement, ou dans l'eau des nappes

- Capteurs horizontaux , ces capteurs sont répartis et enterrés à faible profondeur (de 0,60 m à 1,20 m). selon la technologie employée, de l'eau glycolée ou le fluide frigorigène de la pompe à chaleur circule en circuit fermé à l'intérieur de ces capteurs. la surface de capteurs nécessaire représentera environ 1,5 à 2 fois la surface habitable à chauffer. Pour une maison de 150 m<sup>2</sup>, les capteurs occuperont donc entre 225 et 300 m<sup>2</sup> du jardin

- Sondes géothermiques verticales les sondes verticales sont installées dans un forage et scellées par du ciment. la profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres, là où la température du sol est stable tout au long de l'année. on y fait circuler en circuit fermé de l'eau glycolée. l'emprise au sol est minime par rapport aux capteurs horizontaux. Pour chauffer une maison de 120 m<sup>2</sup> habitable, une sonde géothermique de 100 m de profondeur est suffisante.

Pompes à chaleur sol/eau, l'énergie extraite contenue dans le sol est restituée le plus souvent à travers un plancher chauffant.

La pompe à chaleur eau/eau, la plus performante car elle utilise l'eau d'un puits, d'une rivière, d'un lac pour puiser l'énergie nécessaire .

La pompe à chaleur est bien entendu un chauffage électrique mais c'est le plus performant comparativement à tout autre chauffage électrique. Il conviendra dans le choix de la puissance nécessaire pour chauffer une habitation d'effectuer un bilan thermique .

Donc : une pompe à chaleur géothermique, ou PAC géothermique est un équipement qui utilise les calories présentes dans le sol pour chauffer l'eau permettant d'alimenter l'habitation en eau chaude sanitaire et en chauffage. Les calories peuvent être captées de différentes manières, c'est-à-dire, soit verticalement, soit horizontalement, soit de manière elliptique.

L'avantage d'une pompe à chaleur à géothermie est qu'elle fonctionne tout au long de l'année. En effet, si les systèmes utilisant l'énergie des rayons du soleil sont dépendants des conditions climatiques, ce n'est pas le cas de la pompe à chaleur à géothermie puisque la chaleur du sol, au niveau des capteurs, reste la même quelle que soit la température extérieure.

Grâce à ce type d'équipement, une habitation peut réduire sa facture de chauffage annuelle par 3 ou 4. Ce type d'économie permet de rentabiliser le prix d'achat et le prix d'installation d'une PAC géothermique après plusieurs années d'utilisation.

Utiliser la chaleur de la Terre pour chauffer sa maison

Afin de produire de l'eau chaude sanitaire et d'alimenter les radiateurs d'un logement, la pompe à chaleur à géothermie utilise les calories produites par la chaleur de la Terre afin de se nourrir d'une énergie gratuite et respectueuse de l'environnement pour fonctionner. Le circuit d'eau chaude pour chauffer l'habitation est compatible avec des radiateurs, mais aussi avec des planchers chauffants. Afin de capter, ces calories, les capteurs doivent être enfouis dans le sol par un professionnel spécialisé dans ce type d'installation.

Le coefficient de performance (COP)

La récupération d'énergie naturelle extérieure captée par la pompe à chaleur grâce au principe de la géothermie permet à l'appareil de pouvoir ensuite utiliser cette chaleur de manière intelligente. Le coefficient de performance, ou COP, permet de connaître les performances énergétiques d'un appareil avant son achat. Il faut en effet s'intéresser à l'indice de performance d'une pompe à chaleur à géothermie pour choisir un modèle adapté à vos besoins.

Le coefficient de performance évalué pour préciser les caractéristiques d'un produit est calculé en fonction d'une température extérieure comprise entre 7 et 10 °C. Il indique le rendement du système par rapport :

- à la quantité d'énergie produite ;
- et la quantité d'énergie utilisée.

En fonction du système de chaleur choisi, l'indice de performance est différent. L'indice de performance est exprimé en kWh produit par rapport à la consommation d'1 kWh. Le chiffre indiqué peut aller de 1 à 7. Plus l'indice est élevé, moins la pompe à chaleur à géothermie consomme d'électricité pour produire de la chaleur.

Par exemple, le captage vertical sur nappe phréatique permet d'obtenir des pompes à chaleur eau-eau dont le coefficient de performance est toujours de 5. En effet, comme nous l'avons précédemment expliqué, la température de l'eau captée reste constamment entre 8 et 12 °C. En moyenne, le coefficient de performance d'une pompe à chaleur standard est compris entre 3 et 4.

### Fonctionnement

Ce mode de chauffage écologique utilise la chaleur qui stagne dans le sol pour alimenter le logement en chauffage. Grâce à l'inertie, la température présente dans le sol n'est pas impactée par les changements de température que nous ressentons au-dessus du sol. Cette caractéristique permet à la pompe à chaleur géothermique de récupérer une énergie fiable et constante jour et nuit, tout au long de l'année.

La chaleur captée circule dans des tuyaux en polyéthylène. Le système de captage est en fait constitué :

- d'une pompe de circulation ;
- d'un point de prélèvement avec crépine ;
- des filtres) ;
- et un système de rejet.

Selon le type de capteur choisi, les spécificités de l'installation ne seront pas les mêmes.

Type de capteurs	Installation des capteurs	Difficulté des travaux	Inconvénients
captage horizontal au sol*	<ul style="list-style-type: none"> <li>- capteurs enterrés à une profondeur comprise entre 60 cm et 1,20 m</li> <li>- grande surface nécessaire correspondant à 1,5 fois la surface de l'habitation à chauffer</li> </ul>	faible	<ul style="list-style-type: none"> <li>- impossible de planter des arbres avec de trop longues racines autour de la maison</li> <li>- grande surface nécessaire</li> </ul>
captage vertical au sol (ou sondes géothermiques)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- idéal pour les terrains dont la surface est petite</li> <li>- capteurs enterrés à une profondeur de 100 m maximum</li> <li>- capteurs sont moins sensibles aux changements de température à la surface</li> <li>- plus performants que les capteurs horizontaux</li> </ul>	conséquente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- prix élevé</li> <li>- forage très profond</li> </ul>
captage vertical sur nappe phréatique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- très performant</li> <li>- température de l'eau d'une nappe phréatique est stable (entre 8 et 12 °C)</li> </ul>	conséquente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- uniquement possible si la maison est située au-dessus d'une nappe phréatique</li> </ul>
captage elliptique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mélange de deux techniques : captage horizontal au sol et captage vertical au sol</li> <li>- spirale de 40 cm de diamètre et de 3 m de long</li> <li>- moins de place nécessaire que pour l'installation des capteurs horizontaux</li> <li>- profondeur nécessaire est bien moins importante que pour installer des capteurs verticaux (5 m de profondeur suffisent)</li> </ul>	rapide	

Le captage horizontal au sol de la pompe à chaleur à géothermie est le type d'installation le plus présent en France dans les habitations.

## Une solution de chauffage principal

La pompe à chaleur à géothermie ne sert pas uniquement de solution de chauffage secondaire. Elle a tout à fait les capacités pour alimenter à elle seule l'ensemble de la maison, à condition que l'installation des capteurs soit bien adaptée. Pour cela, le professionnel contacté commence toujours par étudier vos besoins, selon sa taille, les performances de son isolation, etc.

Cependant veuillez noter que la pompe à chaleur à géothermie n'est pas suffisante dans une zone où les températures extérieures sont trop froides. Ce sera notamment le cas pour des zones où la température extérieure est de  $-10^{\circ}\text{C}$  au minimum pendant plusieurs jours de suite. Dans ces conditions climatiques là, la pompe à chaleur à géothermie sera une solution de chauffage d'appoint fiable et peu coûteuse.

### V.4.2.2 Les PAC Aquathermiques

Les pompes à chaleur sur nappes ou sur aquifères les pompes à chaleur sur nappes puisent la chaleur contenue dans l'eau : nappes phréatiques (où la température de l'eau est constante entre  $7$  et  $12^{\circ}\text{C}$ ), rivière ou lac. Elles nécessitent deux forages pouvant atteindre chacun plusieurs dizaines ou centaines de mètres de profondeur. ce type d'installation permet de fournir le chauffage et rafraîchissement aux bâtiments collectifs ou tertiaires et, si la nappe est située à faible profondeur, aux maisons individuelles.

Pompes à chaleur air/eau, ici la source froide c'est l'air et la source chaude c'est de l'eau dont les émetteurs peuvent être un plancher chauffant, des ventilo-convecteurs ou des radiateurs.

### V.4.2.3 Les PAC Aérothermiques

Les PAC aérothermiques puisent la chaleur dans l'air extérieur la pompe à chaleur via son bloc installé à l'extérieur du logement et prélève la chaleur de l'air extérieur pour chauffer le logement. Bien que les performances se réduisent avec la baisse de la température extérieure (y compris du fait des cycles de dégivrage), du fait des progrès technologiques importants qu'ont connus ce type de Pac dans les dernières années<sup>1</sup>, le coefficient de performance reste aujourd'hui nettement supérieur à 2 pour une température extérieure de  $-7^{\circ}\text{C}$  avec un plancher chauffant. certaines pompes à chaleur sont capables de fonctionner jusqu'à des températures extérieures pouvant descendre jusqu'à  $-15^{\circ}\text{C}$  voir  $-20^{\circ}\text{C}$ . En dessous de sa température d'équilibre (liée au dimensionnement), la pompe à chaleur continue (ou non<sup>2</sup>) de fonctionner et elle sollicite en complément un appoint pour assurer le chauffage du logement. En dessous

de sa température minimale de fonctionnement, la pompe à chaleur s'arrête et l'appoint assure le chauffage du logement.

Pompe à chaleur air/air, elle utilise l'air comme source froide et source chaude, ici les performances diminuent en fonction de l'abaissement de la température extérieure

#### V4.3 Mesure de la performance d'une PAC

En mode chauffage :

COP on l'appelle (coefficient de Performance), le rapport entre l'énergie thermique utile restituée pour le chauffage et l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner la pompe à chaleur. Energie consommée par la PAC (compresseur et auxiliaires) COP = énergie produite par la PAC (chaleur restituée dans le bâtiment) avec un COP de 4, une Pac qui consomme 1 kWh d'électricité – telle qu'elle est mesurée au compteur (énergie finale) – produit 4 kWh de chauffage. ce coefficient traduit la performance énergétique d'une pompe à chaleur en mode chauffage

• Le COP machine : il rend compte du niveau de performance déterminé en laboratoire, dans des conditions d'essais spécifiques. il est valable pour une température d'essai donnée

• Le COP système : il prend en compte tous les éléments du système : la pompe à chaleur mais aussi les circulateurs, les pompes de relevage de l'eau, les accessoires divers, etc

• Le COP saisonnier (appelé également SPF, Seasonal Performance Factor) : il s'agit du COP système enregistré sur une saison complète de chauffe.

En mode rafraîchissement :

EER (Energy Efficiency ratio) est le coefficient d'efficacité frigorifique. il représente la performance énergétique de la pompe à chaleur fonctionnant en mode rafraîchissement.

$$EER = \frac{\text{énergie transférée par la PAC (chaleur prélevée dans le bâtiment)}}{\text{énergie consommée par la PAC (compresseur et auxiliaires)}}$$

#### V.4.4 Autres types de PAC

#### V4.4.1 La PAC "haute température "

" Haute température " est un terme général désignant un système de compression complexe pour permettre aux PAC de fournir une chaleur suffisante alors même que la température de la source froide est faible ou que la consigne de la température de la source chaude est élevée.

Principes généraux :

La PAC "haute température" est un terme générique qui reprend 2 familles de technologie différentes :

- Premièrement, on retrouve la famille des pompes à chaleur intégrant dans un système, deux compresseurs soit en série sur le même circuit frigorifique soit étagés sur deux circuits différents de compression.
- Deuxièmement, on parle de la famille des PAC avec réinjection du fluide frigorigène à l'état gazeux, liquide ou vapeur dans le compresseur.
- Troisièmement, certains appareils associent ces deux concepts.

Les PAC de la première famille sont utiles lorsque les écarts de températures entre la source froide et la source chaude est important et lorsque la température de départ est élevée. Il est possible d'atteindre une température d'eau de chauffage de 80°C pour une température extérieure de -20°C.

Les PAC de la deuxième famille permettent de stabiliser la puissance thermique de la PAC même lorsque les températures de la source froide sont négatives jusqu'à -20°C et d'améliorer le COP à basse température par rapport à une PAC avec sa résistance d'appoint à basse température extérieure et de limiter les cycles de dégivrage ainsi que leur durée.

L'objectif commun aux 2 familles de PAC "haute température" est de diminuer la chute du COP lorsque la source froide est faible ou que la source chaude est importante, cependant ce frein est limité ce qui réduit le champ d'application de cette technologie "haute température" dans le domaine de la pompe à chaleur.

Au niveau du budget, il faut tabler sur un coût d'investissement d'au moins 30% supérieur au coût d'une PAC moderne avec un cycle de compression classique. L'entretien est également plus important étant donné la complexité du circuit hydraulique et des taux de compression plus élevés.

Le compresseur utilisé est généralement de type scroll inverter.

Ce type de PAC est intéressant dans le domaine de la rénovation, lorsqu'il s'agit de remplacer un ancien générateur de chauffage tel qu'une chaudière au mazout tout en préservant un système de distribution du chauffage inadapté à la basse température. De plus, la technologie "haute température" dispense la PAC d'un appoint thermique quelconque.

#### a/ Principe de la compression biétagée

Lorsque le taux de compression est élevé, c'est à dire lorsque la différence de pression entre la phase de condensation et la phase d'évaporation est élevée ( $>25$ ), la compression biétagée est requise afin de limiter les chutes de rendement énergétiques et d'éviter des températures de compression trop élevées.

La compression biétagée indique que l'on va compresser le fluide à deux niveaux de pression différents, le premier étage équivaut au cycle de compression inférieure tandis que le second, au cycle de compression supérieure.

Selon les cas de figure, le fluide sera compressé sur deux niveaux de compression différents, soit via deux compresseurs différents soit au sein d'un seul et même compresseur modulant. Entre ces deux phases de compression, le fluide sortant du premier étage de compression, est refroidi à pression constante avant de passer à l'étage supérieur de compression.

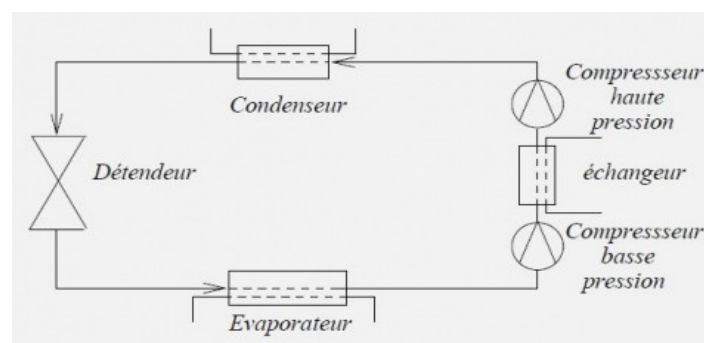


Fig 5.16 Schéma de principe d'une compression biétagée

#### b/ Principe de l'injection

Le principe d'injection est de renvoyer du fluide frigorigène sous forme liquide, gazeux ou les deux, provenant du premier étage de compression vers le compresseur.

Les objectifs principaux sont :

- Contrôler et limiter les températures de refoulement des gaz après chaque phase de compression.

- Augmenter ou stabiliser la puissance thermique malgré des sources chaudes ou froides défavorables.

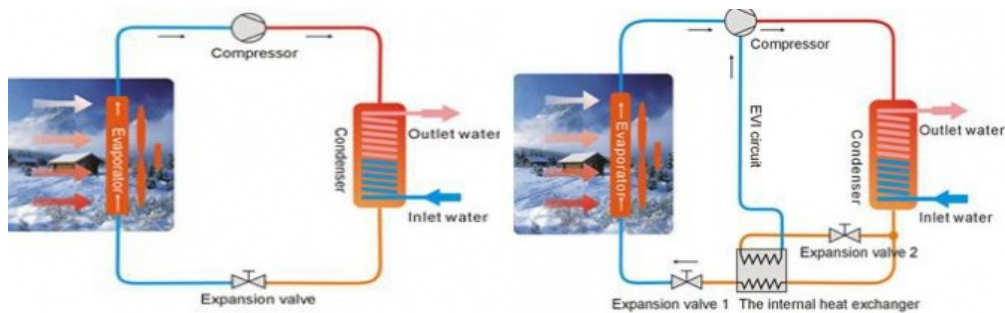


Fig 5.17 Comparaison d'un schéma de cycle frigorifique classique et d'un système EVI

### c/ Principe du montage en cascade

Cette technique consiste à positionner plusieurs circuits frigorigènes les uns à la suite des autres de manière à augmenter ou diminuer progressivement la température à atteindre.

Dans une pompe à chaleur en mode chauffage, le condenseur du premier circuit sera l'évaporateur du 2<sup>e</sup>, le condenseur du 2<sup>e</sup> circuit sera l'évaporateur du 3<sup>e</sup> et ainsi de suite. Ce système permet à chaque cycle d'atteindre une température plus élevée. Dans le cas d'un mode refroidissement (PAC réversible), le système est inversé.

De manière générale, cette technique au sein des pompes à chaleur ne cumule pas plus de 2 cycles en cascade.

**Ce principe permet de travailler avec des fluides frigorigènes adaptés à chaque étage de compression et d'optimiser le rendement de chaque étage.**

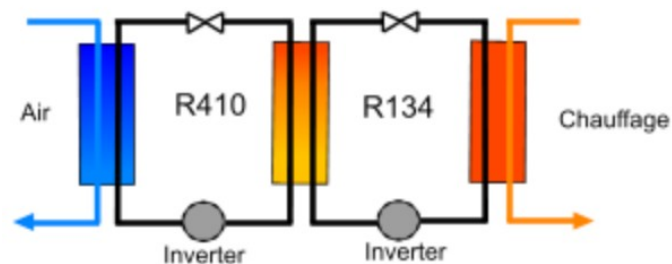


Fig 5.18 Exemple de cycle en cascade utilisant deux fluides différents

## V4.4.2 La "pompe à chaleur hybride"

Cette PAC assure un approvisionnement de chaleur toute l'année en optimisant intelligemment le travail de deux générateurs de chaleur, c'est-à-dire le binôme composé de la pompe à chaleur et de la chaudière à condensation.

### Principes généraux

Des produits tels que les PAC hybrides (chaudière et PAC intégrée) se sont rapidement implantés dans le marché afin de répondre à la demande du secteur de la rénovation pour les logements résidentiels.

La particularité de la PAC hybride est premièrement d'avoir une sécurité de production de chaleur, c'est-à-dire une chaudière à condensation couplée à une PAC dans un même habillage. Deuxièmement, la régulation commande soit le fonctionnement unique de la PAC soit le travail en binôme avec la chaudière soit autorisé le fonctionnement unique de la chaudière. Ces priorités de fonctionnement dépendent du coût des vecteurs énergétiques et des rendements de la PAC.

Dans certains cas, la pompe à chaleur peut préchauffer l'installation avant l'intervention de la chaudière.

C'est le régulateur qui détermine laquelle des deux machines doit se mettre en route ou les deux en fonction du COP et du coût du vecteur énergétique. En cas de  $T^{\circ}$  extérieure trop faible ou de puissance thermique trop importante, le COP chute et donc le coût de fonctionnement de la PAC électrique n'est plus intéressant. La chaudière prend alors le relais et fournit le complément ou la totalité de chauffage.

De manière générale, la régulation se base sur une priorité du coût du vecteur énergétique mais il est possible de passer sur une régulation qui priorise la quantité de  $CO^2$  émise.

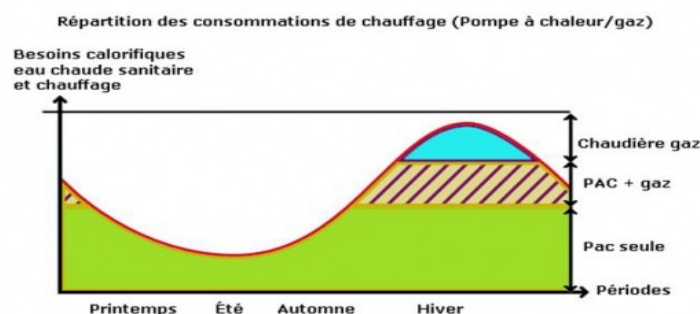


Fig 5.19 répartition des consommations

Comme le montre ce schéma, dans une telle installation, c'est la pompe à chaleur qui fonctionne seule la plupart du temps à savoir environ 75% de l'année. La chaudière ne fonctionne que dans des cas où un besoin d'eau à température importante est nécessaire ou quand l'écart entre les températures intérieure-extérieure augmente.

### V4.4.3 PAC hybride avec son groupe extérieur

Étant donné que ce système est la combinaison d'une pompe à chaleur et d'une chaudière à haute performance, il est plus cher à l'achat qu'une chaudière classique par contre, son coût est inférieur à celui d'une pompe à chaleur classique à puissance équivalente

Grâce à la régulation intelligente combinant une PAC à une chaudière à condensation, cette solution peut s'avérer intéressante au moment du remplacement de sa chaudière sans obligation de changement du système d'émission existant.

Il existe plusieurs variétés de pompe à chaleur gaz dans lesquelles le gaz est soit utilisé comme combustible soit utilisé comme acteur dans le cycle de combustion.

Certaines pompes à chaleur combinent donc des gaz différents tels que le gaz naturel pour la combustion et du gaz ammoniac ou encore de l'eau à l'état vapeur comme acteur dans le cycle utile à la restitution de la chaleur naturelle.

#### V4.4.4 La pompe à chaleur avec moteur à combustion

**Ce type de pompe à chaleur est fort proche de la PAC électrique classique. Sa principale différence concerne son compresseur qui est entraîné non pas électriquement mais par un moteur à combustion par l'intermédiaire d'un arbre de transmission.**

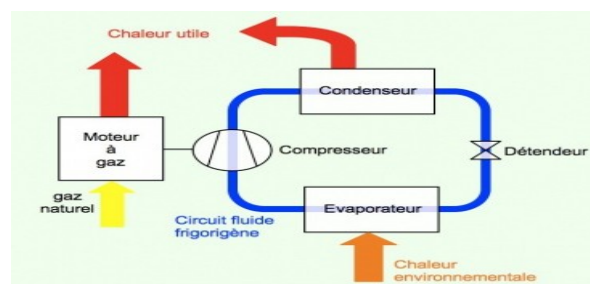


Fig 5.20 Schéma de fonctionnement d'une PAC à moteur gaz

Ce type de cycle comprend deux mécanismes pour l'apport de la chaleur :

- Un moteur gaz actionne un compresseur afin d'augmenter le niveau énergétique du fluide frigorigène.
- On récupère l'énergie thermique dégagée par le moteur à gaz vers le circuit de chauffage.

Le rendement mécanique du moteur à gaz est relativement mauvais car il ne dépasse pas 50% par contre on récupère en grande partie la chaleur dégagée par le travail du moteur. Ce recyclage confère un rendement thermique très satisfaisant malgré un rendement mécanique limité.

Au final, on parle de rendement saisonnier de l'ordre de 110% à 120%. Il existe des pompes à chaleur gaz de différentes puissances dont la gamme s'étend de 20 à 1000 KW.

#### V4.4.4 La pompe à chaleur gaz à absorption

Ce type de PAC a la particularité de ne pas utiliser de compresseur. Elle comporte en revanche un circuit secondaire remplaçant la partie « compresseur » : Ce second circuit utilise un deuxième fluide, appelé absorbant, qui comme son nom l'indique, absorbe le fluide frigorigène.

Les couples fluide frigorigène/absorbant les plus courants sont :

- Ammoniac/eau
- Eau/bromure de lithium

Voici un schéma de ce type de cycle :

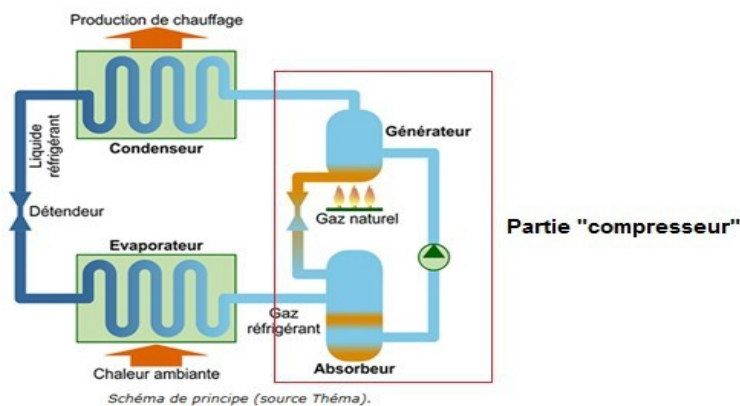


Fig 5.21 PAC à chaleur gaz à absorption

**Dans ce schéma, on constate que le cycle frigorifique utilisé est relativement similaire à celui rencontré dans une PAC « classique » si ce n'est que le compresseur mécanique est remplacé par un processus chimique.**

Le cycle se compose donc bien des phases de condensation, de détente, d'évaporation et de compression comme pour une PAC électrique.

Dans le cas de la compression chimique, le processus se réalise en 2 cycles :

## **L'absorption**

:

L'absorbant liquide capte le fluide réfrigérant au niveau de l'absorbeur au cours d'une réaction chimique exothermique. De cette réaction chimique résulte un dégagement de chaleur. Celle-ci est récupérée via un échangeur. Cette réaction augmente le niveau de pression et la solution composée des 2 fluides est amenée via un circulateur au générateur (aussi appelé bouilleur).

## **La désorption :**

C'est dans le bouilleur que les deux fluides vont à nouveau être séparés suite à une réaction endothermique, c'est-à-dire grâce à un apport externe de chaleur. La source de cette chaleur est un brûleur au gaz. Cet apport permet de séparer les 2 fluides. L'absorbant liquide est ensuite renvoyé à l'absorbeur via un détendeur afin de le ramener à basse pression tandis que le fluide frigorigène, de nouveau en phase gazeuse, continue son parcours vers le condenseur.

L'énergie thermique récupérable peut aller jusqu'à 160% de l'énergie consommée par le brûleur.

Les principaux inconvénients de ce système sont:

- Son encombrement
- Son coût d'investissement
- Sa complexité

Ce système est relativement sûr et solide ce qui implique une maintenance limitée. Son absence de moteur lui confère une durabilité élevée, c'est-à-dire plus de 20 ans. Les performances sont bonnes étant donné que l'on peut espérer un COP saisonnier de 130% alors même que le régime de température de l'eau de chauffage est élevé (60°C).

### **V 4.4.5 La pompe à chaleur gaz à adsorption**

Ce type de pompe à chaleur utilise, comme son nom l'indique, un cycle à adsorption. N'étant pas à confondre avec le cycle à absorption, ce type de cycle consiste à utiliser les propriétés d'une pierre appelée zéolithe. Ce matériau a la propriété particulière d'absorber sur sa surface les molécules d'eau ce qui provoque un dégagement de chaleur grâce à une réaction exothermique (adsorption). La zéolithe peut relâcher ces molécules d'eau grâce à une réaction endothermique (désorption).

On utilise l'eau comme fluide caloporteur.

Il s'agit donc de distinguer deux phases de fonctionnement : **l'adsorption et la désorption.**

### **L'adsorption**

De l'eau, placée sous vide dans un réservoir, est chauffée par l'intermédiaire d'un échangeur. La chaleur fournie par ce dernier vient soit de panneaux solaires thermiques soit d'autres sources de chaleur telles que l'air, le sol, l'eau ou encore la récupération de chaleur fatale. S'en suit une évaporation de l'eau. Les molécules de l'eau, désormais à l'état vapeur, vont se fixer sur la zéolithe, située dans la partie haute du réservoir.

Ce captage d'eau évaporée par la zéolithe provoque une réaction exothermique. La chaleur résultante est récupérée via un échangeur passant dans la zéolithe vers le circuit de chauffage.

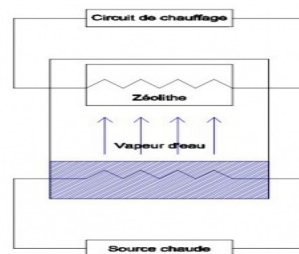


Fig 5.22 Schéma de principe de l'adsorption

### **La désorption :**

Durant cette phase, on inverse le cycle de manière à chauffer la zéolithe grâce à un brûleur gaz. Ainsi, l'eau précédemment captée est relâchée et retombe dans le bas du réservoir à l'état liquide. Le cycle peut alors recommencer. La chaleur de l'eau est récupérée afin d'être envoyée dans le circuit de chauffage.

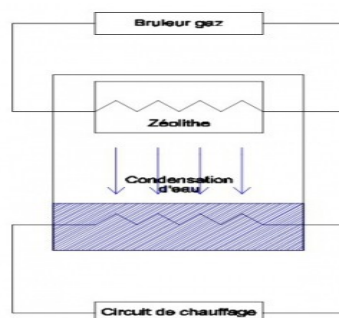


Fig 5.23 Schéma de principe de la désorption

Au cours de la phase de désorption, la chaudière a une double utilité. En plus de chauffer la zéolithe pour en extraire l'eau absorbée, elle participe au système de chauffage via un deuxième échangeur. De plus, on intègre un système de récupération d'énergie latente de condensation des fumées, comme pour une chaudière à condensation, ce qui optimise les performances de cette partie « chaudière ». On continue donc de chauffer les locaux pendant la phase de désorption.

Au cours de la désorption, on récupère donc la chaleur de 2 manières, en refroidissant l'eau récupérée et via le brûleur au gaz.

Ce type de pompe à chaleur peut offrir un bon rendement saisonnier sur énergie primaire (environ 130%) si le système est bien dimensionné. Il est initialement prévu pour des grandes installations (plus de 100KW) mais commence à s'immiscer dans le secteur résidentiel pour de puissances modulables allant de 1,5KW jusqu'à 10-15 KW. Il est par ailleurs silencieux et très solide ce qui lui permet d'être un investissement à long terme, à l'instar de la pompe à absorption.

Il prend néanmoins beaucoup de place et est encore fort cher à l'achat. Comme pour le système de pompe à chaleur à absorption, ce type de cycle peut également être utilisé pour créer du froid.

### Caractéristiques

Etant donné la présence d'un générateur de chaleur dans les procédés des PAC gaz tel que le moteur à gaz ou le brûleur à gaz, la part d'énergie provenant de la source naturelle est beaucoup moins importante. Cette source de puisage thermique, fortement influencée par son environnement est donc beaucoup moins influente sur les performances d'une PAC à gaz.

Effectivement, on remarque que la capacité thermique de la PAC à gaz ainsi que ses performances thermiques restent relativement stables malgré une disponibilité énergétique très variable provenant de la source naturelle.

Etant donné que le puisage énergétique naturelle est moins conséquent, les ventilateurs et les évaporateurs seront moins imposants et donc plus économiques notamment en termes de consommation et de composition.

La température de la source chaude est également un facteur moins influent sur les performances du système au gaz par rapport au système électrique. Du coup, on retient la réduction financière importante dont on pourrait bénéficier dans

le secteur de la géothermie, étant donné que l'on peut diminuer de moitié le nombre de sondes à implanter dans le sol par rapport à la PAC électrique.

De plus, les résistances électriques sont bannies et les cycles d'inversion pour le dégivrage inutiles.

Un autre avantage de taille est de ne jamais être limité par la capacité des installations électriques alors que dans le cas de PAC électriques, c'est un facteur d'exclusion récurrent.

Finalement, mis à part les PAC à moteurs thermiques, on parle d'une durée de vie conséquente, supérieure à 20 ans et de systèmes relativement peu bruyants.

Cependant, il est important d'indiquer que les systèmes sont relativement complexes, que ce soit au niveau du circuit hydraulique ou des entretiens techniques, que les coûts sont encore relativement élevés et que peu de produits sont actuellement adaptés au secteur du petit résidentiel.

## Conclusion

Produire du froid à partir d'un équipement , c'est tout l'intérêt de la machine frigorifique, cependant , produire du chaud et du froid à partir d'un même matériel , C'est l'intérêt de la pompe à chaleur réversible qui permet de fournir alternativement chauffage en hiver et rafraîchissement en été.

Se sont des outils essentiels pour optimiser l'accueil dans les commerces, pour assurer des conditions de travail satisfaisantes, voire pour préserver la qualité de certains matériels ou produits en été (informatique, différents matériaux, aliments...).

Donc, on peut tirer comme conclusion que produire de l'énergie (froid et chaud) est fonction de plusieurs paramètres qui sont en conséquent les objectifs prétendus , et se sont le niveau de température souhaité, la puissance et la consommation énergétique abordable.

On dira que parmi deux corps, celui qui est le plus froid est celui dont la température est la plus basse.

Un objet est ressenti comme « froid » quand la chaleur contenue dans votre main s'échappe vers cet objet : la main perd donc de la chaleur et refroidit. C'est cela qu'on ressent.

À l'inverse, un objet est ressenti comme « chaud » quand de la chaleur s'échappe de l'objet pour aller dans votre main : la main gagne de la chaleur et se réchauffe. La chaleur va toujours du corps le plus chaud au corps le plus froid.

Quand on parle de la production du froid, on parle d'un réfrigérateur ou d'un système cryogénique : ces systèmes produisent du froid, en abaissant la température dans un endroit confiné.

Pour refroidir un objet, il faut en extraire la chaleur ou cesser de le réchauffer. Il existe plusieurs méthodes pour extraire la chaleur .

Les températures habituelles d'utilisation des machines frigorifiques impliquent une pression de fluide supérieure à la pression atmosphérique.

Les installations frigorifiques ont pour but de mettre ou de maintenir un système à une température inférieure à celle de l'environnement. Ces installations peuvent être de deux types : directe ou indirecte. La conception d'une machine frigorifique industrielle est basée à la fois sur l'objectif du système (refroidissement, congélation...), son bilan thermique, les conditions climatiques.

Les machines frigorifiques sont basées sur la propriété de certains fluides de s'évaporer et de se condenser à des températures différentes en fonction de la pression.

## Références Bibliographiques

1. I.H. Noack et r. Seidel, Pratique des installations frigorifiques, Editions PYC
2. P.j. Rapin et p. Jacquard, Installations frigorifiques, Editions PYC.
3. I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque Département Génie Thermique et énergie
4. Cours de machines frigorifiques Olivier Perrot 2010-2011
5. Université Libre de Bruxelles, Service d'Aéro-Thermo-Mécanique, Avenue F. D. Roosevelt 50, 1050 Bruxelles, Belgique, Thermodynamique appliqué Cycles frigorifiques Alessandro Parente 2011.
6. Olivier Bonnefoy Machines thermiques Eléments de cours Olivier Bonnefoy école nationale supérieure des mines saint-etienne Année 2014-15.
7. CFmnLog technique générale technique du froid cours de base Edition : juillet07 YSH04054.
8. Systemes Thermiques Industriels Synthèse de Cours & Applications avec CyclePad Kairouani Lakdar & Nehdi Ezzedine .
9. cours ressources science et technologie de l'industrie et du développement durable.
10. Facilitateur URE - Article de Fond Philippe Smekens (facilitateur URE pour le SPW – conseiller énergie à la CCIH) Articles de fond en vue d'une publication dans "Le REactif".« Production, distribution et utilisation rationnelles du froid industriel .
11. R. CHELAN, Projet de fin d'études Université de St-Etienne France, La climatisation solaire, 2004.
12. Olivier PERROT 2010-2011 I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque Département Génie Thermique et énergie COURS DE MACHINES FRIGORIFIQUES.
13. cycle frigorifique le 14mars 2003
14. Alessandro Parente Université Libre de Bruxelles (ULB)Service d'Aéro-Thermo-Mécanique Science et technologie de l'industrie et du développement durable
15. R. CLERAC, C. COULON, P. GOYER, S. LE BOITEUX et C. RIVENC THERMODYNAMICS, Cours et travaux dirigés de thermodynamique Université Bordeaux 1, 2003
16. [energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/production-de-froid/machine-frigorifique-a-ab-adsorption](http://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/production-de-froid/machine-frigorifique-a-ab-adsorption)