

Chapitre I

LA MACHINE FRIGORIFIQUE À COMPRESSION MÉCANIQUE

1. PRINCIPES

Trois grands principes guident la conception d'une machine frigorifique :

- les machines frigorifiques sont des *machines thermiques* évoluant suivant les lois de la thermodynamique,
- leur rôle est d'extraire une quantité de chaleur du milieu extérieur à maintenir à basse température dit *source froide*,
- un liquide absorbe de la chaleur en s'évaporant.

À cela on peut ajouter :

- que la vapeur rejette de la chaleur en se condensant,
- qu'en créant un cycle, on peut utiliser le même fluide pour absorber de la chaleur en un point et la rejeter en un autre à condition de lui fournir du travail.

Il ne reste alors théoriquement qu'à trouver :

- un fluide performant pour absorber la chaleur,
- une pompe pour comprimer le gaz et fournir le travail,
- un échangeur pour améliorer l'absorption de la chaleur,
- un autre échangeur pour rendre plus efficace le rejet de cette chaleur.

Ce n'est pas l'objet de cet ouvrage que de faire un cours de thermodynamique, mais, chaque fois que nécessaire, des rappels seront présentés.

2. QUANTITÉ DE CHALEUR

Puisque la machine frigorifique absorbe de la chaleur, il faut définir ce qu'est une quantité de chaleur.

La chaleur est un transfert d'énergie qui s'effectue naturellement et spontanément d'un corps ou d'un milieu chaud vers un corps ou un milieu froid, c'est à dire à une température inférieure.

Par exemple, si l'on chauffe un kg d'eau, on s'aperçoit que la température augmente progressivement. Il semble donc que la quantité de chaleur absorbée par l'eau soit proportionnelle à l'élévation de température.

Si l'on chauffe deux kg d'eau, on constate que pour provoquer la même élévation de température il faut fournir deux fois plus de chaleur. On en conclut alors que la quantité de chaleur absorbée par l'eau est proportionnelle à la masse de cette eau.

Si on laisse revenir à la température initiale notre eau, on observe une transformation inverse de la précédente et on peut aisément admettre que la quantité de chaleur cédée par l'eau au cours de son refroidissement est égale à celle reçue pendant son échauffement.

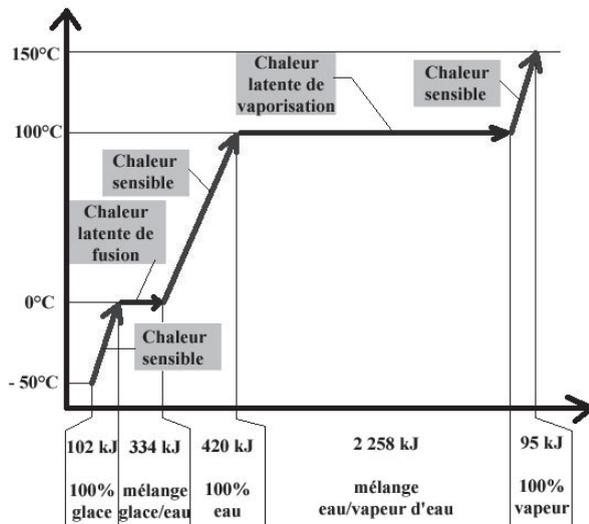
On chauffe maintenant de l'eau et de la glace dans le même récipient. On constate alors que la température ne change pas tant que la glace n'est pas fondue.

Il existe donc deux types d'effets de la chaleur :

- élévation de la température sans changement d'état physique qu'on appelle la chaleur sensible,
- changement d'état sans élévation de température qu'on nomme la chaleur latente.

L'unité de quantité de chaleur du système S.I. est le joule (J).

Dans le graphe ci-dessous sont indiquées les quantités de chaleur nécessaires pour transformer 1 kg de glace à -50°C en 1 kg de vapeur d'eau à 150°C .



On remarque que la quantité de chaleur absorbée est la plus importante lorsque l'eau se vaporise.

3. LA VAPORISATION

La vaporisation est un changement d'état physique. C'est le passage de l'état liquide à l'état gazeux par l'absorption d'une quantité de chaleur.

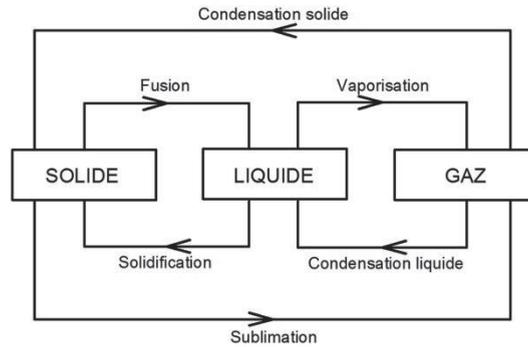
a. Les changements d'état

La matière existe en état d'équilibre sous trois formes :

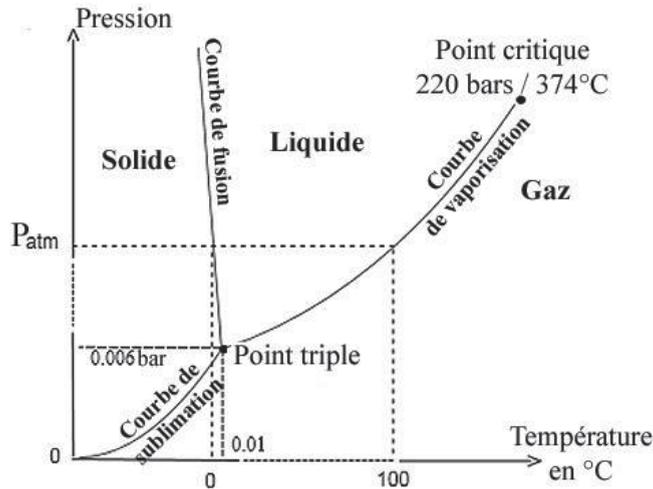
- l'état solide,
- l'état liquide,
- l'état gazeux.

Il est possible de passer de l'un à l'autre de ces états par des transformations.

La figure ci-dessous donne la dénomination de ces changements d'états.



Un corps pur peut se présenter sous les 3 phases. On représente cela, pour l'eau par exemple, par le diagramme ci-dessous.



Lorsqu'un corps pur se présente sous une seule phase (solide ou liquide ou gaz), son état est défini par deux variables, par exemple la pression et la température.

On constate alors que la température à laquelle se réalisent les transformations dépend de la pression exercée sur le corps considéré. Par exemple, à la pression atmosphérique, le gaz carbonique se sublime c'est à dire passe directement de l'état gazeux à l'état solide, ou l'eau se vaporise à 100°C.

Dans le plan (P, T), les trois domaines sont séparés par trois courbes qui représentent des états d'équilibre des deux phases :

- la courbe de sublimation entre le solide et le gaz,
- la courbe de fusion entre le solide et le liquide,
- la courbe de vaporisation entre le liquide et le gaz.

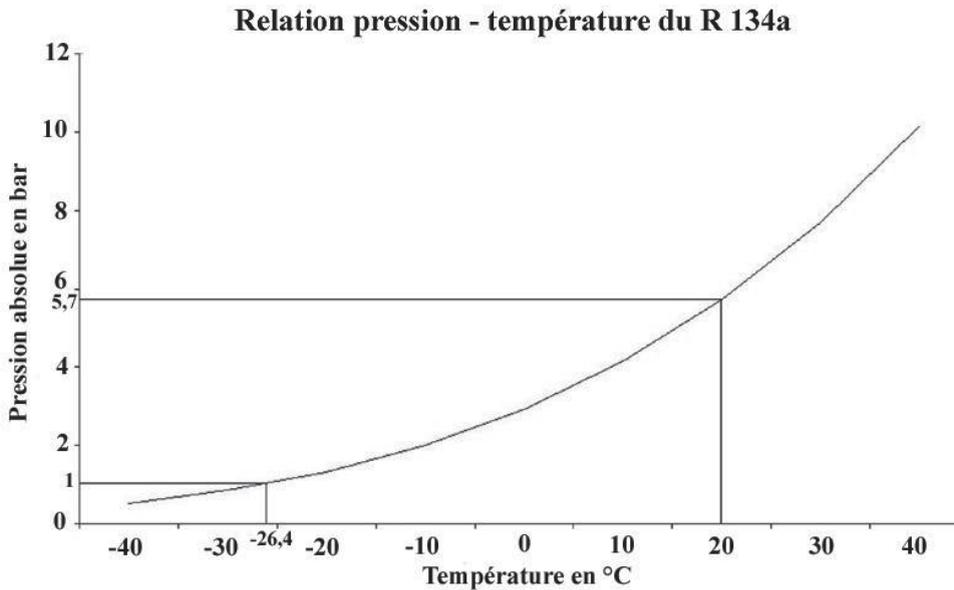
Elles se rejoignent au point triple qui correspond à l'état où il est possible de maintenir en équilibre les trois phases simultanément.

Le point critique représente l'état où la phase de pure vapeur a les mêmes propriétés que la phase de liquide pur. À des températures et pressions plus élevées, il n'est pas possible d'observer une séparation entre les phases liquide et gazeuse.

Chacune des courbes représente un équilibre diphasique. Par exemple, la courbe de vaporisation est l'ensemble des points figuratifs d'un équilibre du liquide avec sa vapeur. L'équilibre diphasique suppose donc que la pression et la température vérifient une relation caractéristique de la nature du fluide que les frigoristes appellent tout simplement *la relation pression-température*.

b. Application à la machine frigorifique

On peut représenter la courbe de vaporisation ou, donc, la relation pression-température du fluide frigorigène R 134a, par exemple, par le diagramme ci-dessous :



On constate qu'à la pression atmosphérique (environ 1 bar abs.) ce fluide change d'état physique, c'est à dire passe de l'état liquide à l'état vapeur, ou de l'état vapeur à l'état liquide, à la température de -26,4°C, toujours, bien sûr, à la condition qu'on lui apporte ou lui ôte une quantité de chaleur.

Si l'on veut absorber de la chaleur dans une chambre froide dont la température intérieure est de 0°C par exemple, il faut que notre fluide se vaporise à environ -8°C . Ce qui correspond aussi, d'après la courbe précédente à une pression d'environ 2,2 bars abs. L'échangeur dans lequel va s'opérer ce changement d'état s'appelle l'évaporateur.

Tout ceci implique qu'il faut disposer d'un appareil qui injecte la bonne quantité de fluide liquide pour absorber la bonne quantité de chaleur et cela à la bonne pression pour que la vaporisation se fasse à la bonne température. Cet appareil est un détendeur.

4. LA CONDENSATION

On vient de voir que la courbe de vaporisation était, en quelque sorte, la frontière entre le passage de l'état liquide à l'état vapeur mais aussi entre le passage de l'état vapeur à l'état liquide.

Ce dernier changement d'état, appelé condensation liquide, se fait en cédant de la chaleur dans un échangeur appelé condenseur. En fait la condensation est le phénomène exactement inverse de la vaporisation. Or, pour céder de la chaleur, le fluide doit être mis en présence d'un médium plus froid que lui.

Mais, on a vu aussi que, par exemple, pour refroidir une chambre froide à 0°C , il fallait vaporiser le fluide à -8°C . Difficile de trouver un médium plus froid dans ce cas. L'idéal serait d'avoir un fluide à une température supérieure à 30°C , par exemple.

Sur la courbe de saturation, on constate que le fluide change d'état à 30°C , s'il est à la pression d'environ 7,7 bars abs. Il faut donc un appareil qui prenne le fluide à la sortie de l'évaporateur et élève, à la fois, sa température et sa pression. Cet appareil s'appelle un compresseur.

5. CONSTITUTION DE LA MACHINE

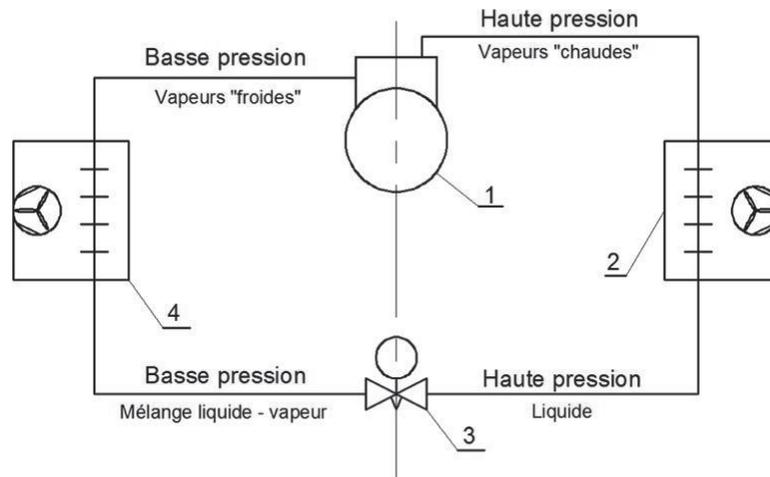
Si l'on résume ce que l'on a appris dans les paragraphes précédents, le schéma d'une machine frigorifique se présente ainsi (voir page suivante) :

On trouve :

- **1** : le compresseur,
- **2** : le condenseur à air forcé,
- **3** : le détendeur,
- **4** : l'évaporateur à air forcé.

On remarque :

- que le détendeur forme une frontière entre le côté haute pression et le côté basse pression de la machine frigorifique,
- les différents états du fluide que l'on précisera par la suite.



6. LES FLUIDES FRIGORIGÈNES

Il est nécessaire d'utiliser un fluide performant pour l'absorption de la chaleur au moment de sa vaporisation. On a donc créé les fluides frigorigènes.

a. Petit historique

Au commencement il y eut l'eau (R 718) pour W. Cullen en 1755, E. Carré en 1866, M. Leblanc en 1907. Elle est toujours utilisée dans d'autres types de machines frigorifiques appelées *machine à compression thermique* ou *machine à sorption*.

Puis on essaya le diéthyléther ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{-O-CH}_3\text{CH}_2$) – (R 610) remarqué par Cullen, proposé par O. Evans en 1805, utilisé par J. Perkins en 1834, J. Harrison en 1855 et par F. Carré en 1857.

Ensuite furent utilisés le diméthyléther ($\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$) de 1863 à 1875, le chimogène, premier mélange en 1866, l'ammoniac (NH_3) – R-717 de 1859 à nos jours, le dioxyde de carbone (CO_2) – (R-744) de 1866 à nos jours.

Mais, aussi, le dioxyde de soufre (SO_2) – (R-764) de 1875 jusqu'aux années 1950, le chlorure de méthyle (CH_3Cl) – (R-40) de 1879 jusqu'aux années 1960, le chlorure d'éthyle ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Cl}$) – (R-160) de 1890 jusqu'aux années 1930, les hydrocarbures comme le méthane, le propane, l'éthylène, le propylène.

Enfin, commença la grande aventure des frigorigènes fluorés à partir de 1920 :

- les chlorofluorocarbones (CFC.) totalement interdits depuis décembre 2000 pour leur action destructrice sur la couche d'ozone,
- les hydrochlorofluorocarbones (HCFC) totalement interdits en janvier 2015 pour la même raison,
- les hydrofluorocarbones (HFC) sérieusement menacés par la directive européenne F-Gas de 2014.

- les hydrofluoro-oléfines ou hydrofluoroalcène (HFO).

b. Numérotation des fluides frigorigènes

- Séries R-10 à R-50, R100, R-2000 et R-1000

On définit R WXYZ par :

- **W** : nombre d'insaturations carbone (C=C),
- **X** : nombre d'atomes de carbone - 1,
- **Y** : nombre d'atomes d'hydrogène + 1,
- **Z** : nombre d'atomes de fluor,
- **a** ou **b** si la molécule est symétrique ou non,
- les zéros ne s'indiquent pas.

Exemple : le R-134a ($C_2H_2F_4$), $W = 0$, $X = 2 - 1 = 1$, $Y = 2 + 1 = 3$, $Z = 4$, a car la molécule est symétrique.

- Séries R-400 et R-500
 - Série R 400 : mélange zéotropique de fluides frigorigènes présentant une différence de relation pression-température entre l'évaporation et la condensation appelée « glissement de température ».
 - Série R 500 : mélange azéotropique de fluides frigorigènes se comportant comme un corps unique donc sans glissement de température.
 - Les numérotations sont chronologiques dans l'ordre de l'acceptation du fluide par l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers).
 - En cas de mélanges de corps identiques, mais dans des proportions différentes, on associe alors la lettre majuscule à la fin de la numérotation (A, B, C...) correspondant à l'ordre chronologique de l'acceptation du fluide par l'ASHRAE.
- Séries R-600
 - Hydrocarbures : R -600 (butane), R-600a (isobutane),
 - composés oxygénés : R-610 (éthyle éther),
 - composés azotés : R-630 (méthyle amine).
- Séries R-700
 - Composés inorganiques,
 - la numérotation commence par 7 suivie de 2 chiffres correspondant à la masse molaire du composé.

c. Caractéristiques principales

Dans le tableau page suivante sont regroupées les caractéristiques principales des fluides frigorigènes les plus utilisés.

| Fluide | Formule | Temp. de vap. à la Patmo. en °C | Glissement de temp. en K | Temp. critique en °C | P.R.G.* | Groupe de sécurité |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------------|---------|--------------------|
| <i>HFC corps unique</i> | | | | | | |
| R 134a | CF ₃ CH ₂ F | -26 | 0 | 101 | 1430 | A1 |
| <i>HFC mélange</i> | | | | | | |
| R 404A | R143a/125/ 134a | -47 | 0,7 | 73 | 3922 | A1 |
| R 407F | R32/125/ 134a | -46 | 6,4 | 83 | 1825 | A1 |
| R 407C | R32/125/ 134a | -44 | 7,4 | 87 | 1774 | A1 |
| R 410A | R32/125 | -51 | <0,2 | 72 | 2068 | A1 |
| R507A | R143a/125 | -47 | 0 | 71 | 3985 | A1 |
| <i>HFO</i> | | | | | | |
| R-1234yf | CF ₃ CF=CH ₂ | -30 | 0 | 95 | 4 | A2(L) |
| R-1234ze | CF ₃ CF=CHF | -18 | 0 | 110 | 7 | A2(L) |
| <i>Fluides non halogénés</i> | | | | | | |
| R-717 | NH ₃ | -33 | 0 | 133 | 0 | B2 |
| R-600a | C ₄ H ₁₀ | -12 | 0 | 135 | 3 | A3 |
| R-744 | CO ₂ | -57 | 0 | 31 | 1 | A1 |

* P.R.G.: potentiel de réchauffement global à 100 ans aussi appelé G.W.P._{100a} en anglais.

d. Choix d'un fluide frigorigène

Le choix du fluide frigorigène se fait en fonction de plusieurs critères.

- En fonction du régime de fonctionnement de l'installation
 - La température de vaporisation du fluide à 1 bar doit de préférence être inférieure à la température d'évaporation la plus basse de l'installation pour qu'aucune partie ne soit en dépression,
 - la température de refoulement doit de préférence être inférieure à la température critique du fluide et de l'huile.
- En fonction des critères écologiques
 - P.R.G., T.E.W.I,
 - respect de la F-Gas européenne.
- En fonction d'une étude thermodynamique comparative
 - Taux de compression, pression HP, température de refoulement,
 - volume balayé, puissance absorbée, COP.