

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Témouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département de Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : Technologie  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Energétique  
Thème

## Etude l'efficacité énergétique d'une chambre froide

### Présenté Par :

- Maarouf El Hadj Aimane
- Maarouf Abd El Madjid

### Devant le jury composé de :

Dr.Remlaoui Ahmed  
Président  
Dr. Bouafia Farida  
Examineur  
Dr. Nehari Tayeb  
Encadrant

UAT.B.B (Ain Témouchent)

UAT.B.B (Ain Témouchent)

UAT.B.B (Ain Témouchent)

Année Universitaire 2021/2022

# *Remerciement*

En premier nous exprimons notre grande reconnaissance au DIEU le tout puissant et miséricordieux, d'avoir nous donner la force, la volonté, la patience et le courage durant toutes ces années d'études, d'avoir nous guider et aider pour achever ce travail après tant d'efforts déployés durant ces années.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre encadrant : Dr. NEHARI TAYEB, pour sa patience, ses encouragements ainsi que pour sa rigueur intransigeante qui nous a beaucoup appris. Nous remercions en lui l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui cette mémoire n'aurait jamais vu le jour. Merci beaucoup monsieur NEHARI.

Nous souhaitons adresser nos remerciements aux membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin nous n'oublions pas d'adresser un remerciement chaleureux à tous ceux et celles de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

# *Dédicace*

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie ce travail :*

*À mes très chers, respectueux et magnifiques parents pour qui je n'oublierai jamais leur grande affection, mon père et ma mère qui m'ont soutenu tout au long de ma vie pour leur patience, leur amour et leur encouragement, tout le long de mes études.*

*À mes frères<<Yasser et Rayane >> et ma sœur<<Achwak>> et sans oublier tous les membres de ma famille.*

*En témoignage de ma sincère amitié je dédie cette mémoire à :*

*<<Rahim, Mouad, Hamza, Mehdi, Imad, Feteh, Bouhdjer,>>*

*Mon binôme, Mon frère<<Maarouf Abd El Majid>*

*A tous mes très chers amis et mes collègues de ma filière génie mécanique énergétique.*

*A tous mes respectueux professeurs.*

*El Hadj Aïmane*

# *Dédicace*

*À mes très chers parents le symbole de tendresse, l'exemple  
du dévouement qui n'ont pas cessé de m'encourager et de  
prier pour moi qui se sont sacrifiée pour mon bonheur et ma  
réussite*

*À mon frère : Nacer*

*À mes très chères sœurs : Marwa et Nesrine*

*En témoignage de ma sincère amitié je dédie cette mémoire  
à :*

*« Riyad, Tayeb, Zakaria Rahim, Mouad, Hamza, Mehdi, »*

*Mon binôme, Mon frère « Maarouf El Hadj Aïmane »*

*A tous mes très chers amis et mes collègues de ma filière  
génie mécanique énergétique.*

*A tous mes respectueux professeurs.*

*Abd El Majid*

## Résumé

Notre étude est théorique mais basée sur des données réelles, ce qui nous a permis de comprendre l'importance et la nécessité de prendre en compte tous les éléments qui interviennent dans l'étude et dimensionnement d'une chambre froide, à partir des emplacements jusqu'au choix des équipements convenables pour une telle ou telle installation frigorifique.

Le but de cette étude est aussi de choisir le meilleur fluide frigorigène et son impact sur l'environnement.

On a effectué des calculs particuliers et précis du bilan thermique qui sont indispensables au choix et au dimensionnement corrects des équipements frigorifiques ; car les erreurs commises à ce niveau risquent d'être irréparables, si elles apparaissent après la réalisation du projet.

Après notre étude effectuée pour la réalisation de cette chambre frigorifique basée sur des calculs précis et détaillés, nous aimerions bien concrétiser notre travail dans la réalité en le réalisant dans le domaine industriel.

## **Abstract**

Our study is theoretical but based on real data, which allowed us to understand the importance and the need to take into account all the elements involved in the study and sizing of a cold room, from its location up to the choice of suitable equipment for a particular refrigeration installation.

The purpose of this study is also to choose the best refrigerant and its impact on the environment.

Particular and precise calculations of the heat balance have been carried out which are essential for the correct choice and sizing of the refrigeration equipment; because errors made at this level risk being irreparable, if they appear after the completion of the project.

After our study carried out for the realization of this cold room based on precise and detailed calculations, we would like to concretize our work in reality by carrying it out in the industrial field.

## ملخص

دراستنا نظرية ولكنها تستند إلى بيانات حقيقية، مما سمح لنا بفهم أهمية وضرورة مراعاة جميع العناصر المشاركة في دراسة وتحجيم غرفة التبريد، من موقعها إلى اختيار المعدات المناسبة لغرفة التبريد. تركيب تبريد خاص.

والغرض من هذه الدراسة هي اختيار المبرد الأفضل وتأثيره على البيئة.

تم إجراء حسابات خاصة ودقيقة لميزان الحرارة والتي تعتبر ضرورية للاختيار الصحيح وحجم معدات التبريد؛ لأن الأخطاء التي يتم ارتكابها على هذا المستوى قد تكون غير قابلة للإصلاح، إذا ظهرت بعد الانتهاء من المشروع.

بعد دراستنا لإنجاز هذه الغرفة الباردة بناءً على حسابات دقيقة ومفصلة، نود أن نجعل عملنا ملموساً على أرض الواقع من خلال تنفيذه في المجال الصناعي.

## ***Nomenclature et abréviation***

---

**CFC**: Chloro Fluoro Carbures.

**HCFC**: Hydro Chloro Fluoro Carbures.

**GES** : Gaz à effet de serre.

**PAC** : Pompe à chaleur.

**HC** : hydrocarbures.

**PRG** : Potentiel de Réchauffement global.

**ODP**: Ozone Déplétion Potentiel.

**GWP** : Global Warming Potentiel.

**COP** : Coefficient de performance.

**Max** : maximum

**Min** : minimum

**HP**: Haute pression

**BP** : Basse pression

**BT** : Base température

**HT** : Haute température

**Q<sub>f</sub>** : la chaleur reçue de la source froide.

**Q<sub>c</sub>** : la chaleur rejetée à la source chaude.

**Q<sub>h</sub>** : la chaleur reçue à partir de cette source à haute température.

**Q** : Quantité de chaleur

**W** : Travail (J)

**h** : enthalpie spécifique (kJ/kg)

**T** : température (K)

**V** : vitesse (m/s)

**S** : entropie (kJ/K)

**D** : diamètre (m)

**η**: rendement théorique.

**P** : Pression (kPa)



## ***Nomenclature et abréviation***

---

$\Delta P$  : Pert de charge (bar)

$\rho$  : Masse volumique ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$\lambda$  : Conductivité thermique ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$Q$  : La chaleur latente

$\Delta U$  : Energie interne

**COPC** : Coefficient de performance calorifique

$q_x$  : Flux de chaleur en watt

$A$  : surface perpendiculaire à la direction en  $\text{m}^2$

$dt$  : Gradient de température suivant x ( $\text{K}/\text{m}$ )

$dx$  : Conductivité thermique du corps en  $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$

$h_i$  : Coefficient de convection intérieur en  $\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$

$h_e$  : Coefficient de convection extérieur en  $\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$

$e_n$  : Epaisseur de La paroi j (n parois composées en série) en m

$K$  : coefficient d'échange ( $\text{N}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$S$  : surface d'échange ( $\text{m}^2$ )

$\Delta T$  : la différence de température ( $T_e - T_i$ )

$T_e$  : température extérieure en ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_i$  : température intérieure en ( $^{\circ}\text{C}$ )

$Q_{re}$  : charge thermique par renouvellement d'air en W

$M_{ae}$  : débit massique de l'air extérieur admis en  $\text{kg}/\text{s}$

$V_{ae}$  : débit volumique de l'air extérieur admis en  $\text{m}^3/\text{s}$

$P_{ae}$  : masse volumique de l'air extérieur admis en  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\tau_p$  : Temps d'ouverture de la porte min/h

# Sommaire

---

|  |    |
|--|----|
| Introduction Générale .....  | 1  |
| Introduction Générale .....  | 2  |
| <b>Chapitre I : Généralités sur les chambres froides</b>               |    |
| I.1. Introduction.....   | 5  |
| I.2. Bref historique de la production de froid.....                    | 5  |
| I.3. Rappel thermodynamique .....                                      | 6  |
| I.3.1.Les principes de la thermodynamique .....                        | 6  |
| • Le premier principe.....   | 6  |
| • Le deuxième principe .....   | 6  |
| • Le troisième principe .....  | 7  |
| I.3.2.Les réactions de transformation thermodynamique .....            | 7  |
| • Transformation endothermique .....                                   | 7  |
| • Transformation exothermique .....                                    | 7  |
| • Définitions de la chaleur latente.....                               | 8  |
| I. 3.3.Les transformations.....  | 8  |
| I.4. Généralités sur les chambres froides .....                        | 9  |
| I.4.1.Les chambres froides positives ou chambre de réfrigération ..... | 10 |
| I.4-2.Les chambres froides négatives.....                              | 13 |
| • La congélation .....   | 13 |
| • La surgélation.....  | 13 |
| I.5. Applications industrielles du froid .....                         | 13 |
| I.6.Production de froid.....   | 14 |
| I.6.1.Généralités sur les moyens de production de froid.....           | 14 |
| • Mélange réfrigérant.....   | 14 |
| • Détente d'un gaz comprimé .....                                      | 14 |

## Sommaire

---

|  |    |
|--|----|
| • Evaporation d'un liquide pur .....   | 14 |
| I.7. Définition d'une machine frigorifique .....                               | 14 |
| I.7.1. Classification des machine frigorifique .....                           | 15 |
| • Machine consommant de l'énergie mécanique (système au moins ditherme).....   | 15 |
| • Machine consommant de l'énergie thermique (système au moins trithermes)..... | 15 |
| • Machines thermo frigorifiques.....   | 16 |
| I. 8. Cycle frigorifique .....   | 17 |
| I.9. Coefficients de performance .....   | 22 |
| I.10. Les fluides frigorigènes .....   | 23 |
| I. 10.1. Les classes de réfrigérants .....                                     | 24 |
| • Les substances inorganiques pures .....                                      | 25 |
| • Les fluides hydrocarbures.....   | 26 |
| • Les fluides hydrocarbures halogénés.....                                     | 26 |
| • Mélanges des fluides (zéotropiques et azéotropiques) .....                   | 27 |
| • Famille des autres fluides .....   | 28 |
| I.10.2. Les séries de fluides frigorigènes.....                                | 28 |
| I.10.3. Critère de choix d'un fluide .....                                     | 33 |
| • Critères thermodynamiques.....   | 33 |
| • Critères environnementaux.....   | 33 |
| • Critères techniques.....   | 34 |
| • Critères technologiques, opérationnels et économiques.....                   | 34 |
| • Critères Physiques.....  | 34 |
| • Critères thermique.....  | 34 |
| I.10.4. Caractéristiques thermodynamiques du fluide .....                      | 35 |
| • Température d'ébullition.....  | 35 |
| • Température critique.....  | 35 |

## Sommaire

---

|   |    |
|---|----|
| • Pressions du cycle frigorifique.....  | 35 |
| • Volume massique à l'aspiration du compresseur .....                                 | 35 |
| I.11. Isolation des chambres froides .....  | 36 |
| I.11.1 Généralités sur l'isolation.....   | 36 |
| I.11.2 La conductivité thermique ou coefficient de conductibilité des matériaux ..... | 36 |

### **Chapitre II : Equipement de la chambre froide**

|   |    |
|---|----|
| II.1. Fonctionnement d'une chambre froide .....           | 40 |
| Quel groupe frigorifique pour votre chambre froide ?..... | 41 |
| II.2. Principaux composants d'une chambre froide .....    | 43 |
| II.3. Comment le froid s'obtient-il? .....                | 44 |
| II.4. Les composantes d'une chambre froide .....          | 45 |
| II.4.1. Compresseur .....                                 | 46 |
| • Différents types de compresseurs .....                  | 48 |
| • Compresseurs à piston .....                             | 50 |
| • Compresseurs à vis .....                                | 50 |
| • Compresseurs scroll (à spirale) .....                   | 51 |
| II.4.2. Condenseur.....                                   | 52 |
| • Généralités .....                                       | 52 |
| • Rôle du Condenseur .....                                | 53 |
| • Différents types de Condenseur .....                    | 53 |
| II.4.3. L'Evaporateur.....                                | 55 |
| • Généralités .....                                       | 55 |
| • Rôle de l'Evaporateur .....                             | 56 |
| • Différents types d'Evaporateur .....                    | 57 |
| II.4.4. Détendeur .....                                   | 58 |

## Sommaire

---

|  |    |
|--|----|
| • Généralités .....                              | 58 |
| • Rôle du Détendeur .....                        | 59 |
| • Différents types de Détendeur .....            | 59 |
| II.4.5. Le réservoir de liquide .....            | 60 |
| • Généralités .....                              | 60 |
| • Rôle de réservoir de liquide .....             | 60 |
| II.4.6. La bouteille anti-coups de liquide ..... | 61 |
| • Généralités .....                              | 61 |
| • Caractéristiques .....                         | 61 |
| • Rôle La bouteille anti-coups de liquide .....  | 61 |
| II.5.7. Voyant liquide .....                     | 62 |
| □ Rôle de Voyant liquide .....                   | 62 |
| Il permet de contrôler .....                     | 62 |
| • Types de Voyant liquide .....                  | 62 |
| • Construction .....                             | 62 |
| • Fonctionnement .....                           | 63 |
| II.4.7. Déshydrateur .....                       | 63 |
| • Généralités .....                              | 63 |
| • Rôles .....                                    | 63 |
| • Types de déshydrateur .....                    | 64 |
| • Les procédés de déshydratation .....           | 64 |
| II.4.8. Vanne électromagnétique .....            | 65 |
| • Rôle .....                                     | 65 |
| • Fonctionnement .....                           | 65 |
| Solénoïde à action directe .....                 | 65 |
| II.4.9. Pressostats .....                        | 67 |

## Sommaire

---

|   |    |
|---|----|
| • Généralités .....                                   | 67 |
| • Types de pressostats.....                           | 68 |
| • Fonctionnement.....                                 | 68 |
| • Pressostat combiné BHP (Basse Haute Pression) ..... | 69 |
| • Généralités .....                                   | 70 |
| • Rôle .....  | 70 |
| II.4.11. Thermostat.....                              | 71 |
| • Principe du thermostat .....                        | 71 |
| • Les différents types de thermostats .....           | 71 |
| II.4.12. Eliminateur de vibrations .....              | 72 |
| II.4.13. L'armoire électrique de chambre froide ..... | 73 |
| Conclusion .....                                      | 74 |

### **Chapitre III: Etude des charges thermiques**

|   |    |
|---|----|
| III.1. Introduction .....   | 76 |
| III.2. Conditions déterminantes.....  | 76 |
| III.3. Présentation d'une chambre froide.....                                   | 77 |
| • Dimensions.....   | 77 |
| III.4. Bilan frigorifique d'une chambre froide .....                            | 78 |
| III.4.1. Les charges thermiques d'une chambre froide .....                      | 78 |
| a. Les charges thermiques externes.....   | 78 |
| b. Les charges thermiques internes .....  | 78 |
| III.5. Détermination charges thermique externes .....                           | 79 |
| III.5.1. Charges thermique par transmission à travers les parois $Q_{tr}$ ..... | 79 |
| III.5.2. Charges thermiques par renouvellement d'air $Q_{re}$ .....             | 83 |
| III.5.3. Charges thermiques ouverture de porte $Q_{op}$ .....                   | 85 |
| III. 6. Calcul des charges thermiques internes .....                            | 86 |

## Sommaire

---

|  |    |
|--|----|
| III. 6.1.Charges thermiques indépendantes des produits entreposés .....          | 86 |
| III. 6.2. Charge thermique due aux personnes $Q_{pe}$ .....                      | 87 |
| III. 7. Charge thermique interne dépendante des denrées.....                     | 87 |
| III. 7.1.Puissance frigorifique intermédiaire d'évaporateur $Q_{int}$ .....      | 87 |
| III.7.2 Charge thermique due aux moteurs des ventilateurs des évaporateurs ..... | 89 |
| III. 7. 3 Charge thermique due résistantes de dégivrage $Q_{dég}$ .....          | 89 |
| III.8. Sélection des composants d'installation frigorifique.....                 | 90 |
| III.9. Calcul de l'installation .....  | 92 |

### Chapitre IV : Résultats et discussion

|   |     |
|---|-----|
| IV.1. Introduction .....  | 95  |
| IV.2. Présentation du logiciel SOL KANE 8.....  | 95  |
| IV.3. Etude d'impact des différents fluides réfrigérants .....                            | 97  |
| IV.4.La méthode du calcul .....   | 97  |
| IV.5. Le réfrigérant R-22.....  | 98  |
| IV.6. Le réfrigérant R-32.....  | 104 |
| IV.7. Le réfrigérant R-410A .....   | 110 |
| IV.8. Le réfrigérant R-152a .....   | 115 |
| IV.9. Comparaison entre les paramètres des fluides (froid positive / froid négative)..... | 120 |
| • La puissance de liquéfacteur.....   | 120 |
| • La puissance du compresseur.....  | 120 |
| • Le rapport de compression.....  | 121 |
| • La déférence de la compression Bass / Haut .....  | 121 |
| • Capacité volumétrique .....   | 123 |
| • Le coefficient de performance .....   | 124 |
| IV.10. Impact des réfrigérantes sur l'environnement.....                                  | 124 |
| • ODP (Ozone Déplétion Potentiel ou Potentiel d'appauvrissement de l'ozone) .....         | 125 |

## Sommaire

---

|   |     |
|---|-----|
| • GWP (Global Warming Potential ou Potentiel de réchauffement global) ..... | 125 |
| IV.11. Conclusion .....   | 125 |
| Conclusion générale .....   | 127 |
| Références bibliographiques .....   | 129 |



## Liste des figures

---

| N°                 | Titre  | Page      |
|--------------------|--|-----------|
| <b>Chapitre. I</b> |  |           |
| <b>I.1</b>         | Les réactions de transformation thermodynamique        | <b>7</b>  |
| <b>I.2</b>         | Diagramme énergétique d'une machine frigorifique       | <b>14</b> |
| <b>I.3</b>         | Cycle d'une machine ditherme                           | <b>15</b> |
| <b>I.4</b>         | cycle tritherme  | <b>15</b> |
| <b>I.5</b>         | principe de fonctionnement d'une machine à compression | <b>16</b> |
| <b>I.6</b>         | principe de fonctionnement d'une machine à éjection    | <b>17</b> |
| <b>I.7</b>         | principe de fonctionnement d'une machine à compression | <b>17</b> |
| <b>I.8</b>         | schéma-type d'un cycle frigorifique                    | <b>18</b> |
| <b>I.9</b>         | cycle frigorifique de Mollier, sur le diagramme (HP)   | <b>19</b> |

## Liste des figures

---

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
|             |   |           |
| <b>I.10</b> | Les fluides frigorigènes                                    | <b>23</b> |
| <b>I.11</b> | Composition de la paroi d'une chambre froide traditionnelle | <b>38</b> |

| <b>Chapitre. II</b> |   |           |
|---------------------|---|-----------|
| <b>II.1</b>         | Chambre froide                          | <b>41</b> |
| <b>II.2</b>         | Schéma d'une installation frigorifique. | <b>43</b> |
| <b>II.3</b>         | machine frigorifique-principe           | <b>44</b> |
| <b>II.4</b>         | Compresseur                             | <b>46</b> |
| <b>II.5</b>         | compresseur ouvert                      | <b>49</b> |
| <b>II.6</b>         | compresseur hermétique                  | <b>49</b> |
| <b>II.7</b>         | compresseur semi –hermétique            | <b>49</b> |
| <b>II.8</b>         | compresseur à piston                    | <b>50</b> |
| <b>II.9</b>         | compresseur à vis                       | <b>50</b> |

## Liste des figures

---

|              |                                    |           |
|--------------|------------------------------------|-----------|
| <b>II.10</b> | compresseur scroll                 | <b>51</b> |
| <b>II.11</b> | Condenseur                         | <b>53</b> |
| <b>II.12</b> | Evaporateur                        | <b>56</b> |
| <b>II.13</b> | Détendeur                          | <b>59</b> |
| <b>II.14</b> | Réservoir liquide                  | <b>60</b> |
| <b>II.15</b> | La bouteille anti-coups de liquide | <b>61</b> |
| <b>II.16</b> | Voyant liquide                     | <b>63</b> |
| <b>II.17</b> | Déshydrateur                       | <b>64</b> |
| <b>II.18</b> | Vanne électromagnétique            | <b>65</b> |
| <b>II.19</b> | Pressostat                         | <b>67</b> |
| <b>II.20</b> | Pressostat BP                      | <b>68</b> |
| <b>II.21</b> | Pressostat HP                      | <b>69</b> |
| <b>II.22</b> | Pressostat combiné BHP             | <b>69</b> |
| <b>II.23</b> | Le séparateur d'huile              | <b>70</b> |
| <b>II.24</b> | Thermostat                         | <b>71</b> |
| <b>II.25</b> | Eliminateur de vibrations          | <b>72</b> |

## Liste des figures

---

|                      |  |            |
|----------------------|--|------------|
| <b>II.26</b>         | L'armoire électrique   | <b>73</b>  |
| <b>Chapitre. III</b> |  |            |
| <b>III.1</b>         | Représentation des composants du plafond   | <b>81</b>  |
| <b>Chapitre. IV</b>  |  |            |
| <b>IV.1</b>          | Histogramme de puissance d'évaporateur   | <b>120</b> |
| <b>IV.2</b>          | Histogramme de puissance du compresseur  | <b>120</b> |
| <b>IV.3</b>          | Histogramme de rapport de compression  | <b>121</b> |
| <b>IV.4</b>          | Histogramme de différence des pressions haut – Bass<br>• <b>(Chambre froid positive)</b> | <b>121</b> |
| <b>IV.5</b>          | Histogramme de différence des pressions haut – Bass<br><b>(Chambre froid négative)</b>   | <b>122</b> |
| <b>IV.6</b>          | Histogramme de Débit massique  | <b>122</b> |

## Liste des figures

---

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| <b>IV.7</b> | Histogramme des capacités volumétrique entre les différents fluides    | <b>123</b> |
| <b>IV.8</b> | Histogramme de coefficient de performance entre les différents fluides | <b>124</b> |

## Liste des tableaux

---

| N°                 | Titre   | Page      |
|--------------------|---|-----------|
| <b>Chapitre. I</b> |   |           |
| <b>I.1</b>         | Les transformations thermodynamique   | <b>8</b>  |
| <b>I.2</b>         | Conditions de conservation des produits réfrigérés pour produits très sensibles et moyenne sensibles au froid     | <b>11</b> |
| <b>I.3</b>         | Reprenant les différentes caractéristiques du fluide selon son emplacement dans le cycle                          | <b>22</b> |
| <b>I.4</b>         | Les fluides inorganiques pures  | <b>26</b> |
| <b>I.5</b>         | Les fluides hydrocarbures   | <b>26</b> |
| <b>I.6</b>         | Les fluides hydrocarbures halogénés   | <b>27</b> |
| <b>I.7</b>         | Fluides frigorigènes  | <b>31</b> |
| <b>I.8</b>         | coefficients de conductibilité thermique des isolants utilisés pour les murs des chambres froides traditionnelles | <b>37</b> |

## Liste des tableaux

---

### Chapitre. II

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| <b>II.1</b> | Classification des compresseurs mécaniques                  | <b>52</b> |
| <b>II.2</b> | Classement des condenseurs                                  | <b>54</b> |
| <b>II.3</b> | Avantages et inconvénients des condenseurs à air et à eau.  | <b>55</b> |
| <b>II.4</b> | Classification des évaporateurs et les coefficients globaux | <b>58</b> |

### Chapitre. III

|              |                                 |           |
|--------------|---------------------------------|-----------|
| <b>III.1</b> | dimensions de la chambre froide | <b>77</b> |
|--------------|---------------------------------|-----------|

### Chapitre. IV

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| <b>IV.1</b> | Propriétés du mélange frigorigène R-22 | <b>99</b>  |
| <b>IV.2</b> | Propriétés du mélange frigorigène R-32 | <b>105</b> |

## Liste des tableaux

---

|             |   |            |
|-------------|---|------------|
| <b>IV.3</b> | Propriétés du mélange frigorigène R-410A  | <b>110</b> |
| <b>IV.4</b> | Propriétés du mélange frigorigène R-152a  | <b>115</b> |
| <b>IV.5</b> | Facteur d'impact sur la couche d'ozone(ODP) et de réchauffement climatique(GWP) | <b>124</b> |



# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

---

## Introduction Générale

Le froid est le terme utilisé pour désigner un manque relatif de chaleur, cependant dans un sens plus large, c'est un moyen de conserver des aliments ou des produits peuvent être altérés et détruits par la chaleur. [1]

Le froid trouve de nombreuses applications dans des domaines très variés (industrie Agroalimentaires, médecine, confort thermique, pétrochimie...) et c'est dans le domaine Alimentaire que le froid occupe une place prépondérante car il permet de limiter les gaspillages (Pertes après récolte...) et de prolonger la durée de conservation des produits ce qui permet un élargissement des échanges.

Dans le domaine agro-alimentaire les denrées entreposées représentent un capital assez considérable. [2]

On a pu estimer que dans certaines régions du monde, 50% des denrées alimentaires Disponibles Se perdent entre la période qui s'écoule entre le moment de la production et celui de la Consommation. Ainsi, dans le domaine alimentaire, l'objectif du froid est de maintenir la qualité Originale des produit en limitant (ou en supprimant) les altérations liées au développement des Microorganismes, altérations très rapides dans les pays chauds à cause des conditions climatiques (Température, humidité relative) qui sont favorables à la Prolifération des bactéries, levures et Moisissures.

Pour les produits fabriqués par l'industrie agroalimentaire (lait, fromage...), le froid permet D'améliorer leur qualité en favorisant la maîtrise des conditions de fabrication par une Optimisation Des paramètres climatiques influençant le comportement des microorganismes.

Le froid permet aussi l'augmentation du volume de production agricole par la modification du cycle Végétatif des plantes améliorant ainsi leur rendement (printanisation des céréales...).

En production animale, le froid permet la conservation longue durée du sperme destiné à l'insémination artificielle ou encore la conservation des sérums et des vaccins destinés à enrayer Les épidémies frappant les animaux.

## Introduction Générale

---

L'avancée technologique de nos jours qui autorise un contrôle plus précis de la température et de l'humidité permet d'améliorer la production du froid.

L'utilisation des atmosphères artificielles permet d'augmenter la durée de conservation de certains Fruits et légumes, de même l'utilisation d'adjuvants permet de renforcer l'action du froid mais leur utilisation doit être conforme à la législation nationale relative à la protection des aliments.

Dans les pays chauds et humides, une température de l'ordre de  $+10^{\circ}\text{C}$  permet une bonne conservation du poisson fumé, du lait concentré ou en poudre, des conserves de viandes...ce qui Montre une bonne complémentarité entre le froid et les autres techniques de conservations (Séchage...).

Il faut retenir que l'alimentation d'une population mondiale sans cesse croissante exige que des efforts réalisés pour accroître les productions alimentaires soient accompagnés d'initiatives Destinées à réduire sinon à éliminer les pertes qui autrement resteraient considérables à toutes les Étapes de la distribution et de la transformation des aliments.

Dans notre mémoire on a choisis étudier la chambre froide en quatre chapitres :

- premier chapitre consacré aux généralités sur les machines frigorifiques et la production du froid.
- Deuxième chapitre représente l'équipement d'une chambre froide (tous les éléments).
- troisième chapitre étudiée les charge thermique et le bilan énergétique d'une chambre froide.
- Quatrième chapitre étudié les performances de 4 réfrigérants(R-22 ; R-410a ; R-152a ;

R-32) avec les résultats et discussions.

**Chapitre. I**  
**Généralités sur les chambres  
froides**

## I.1. Introduction

Fournir du froid à un corps, à un milieu, c'est lui extraire de la chaleur ce qui se traduit par un abaissement de sa température et aussi, bien souvent, par des changements d'états :

Condensation, solidification, etc. Ce sont ces effets du froid qui sont, dans leur grande diversité, au service de l'homme. Les machines frigorifiques permettent, moyennant un apport énergétique, d'extraire de la chaleur aux milieux à refroidir. Elles rejettent cette chaleur, accompagnée de l'équivalent thermique de l'énergie reçue, à température plus élevée, dans le milieu ambiant. Ces machines peuvent aussi être utilisées comme systèmes de chauffage. Si le froid qu'elles produisent alors est généralement sans utilité (on se contente de prélever de la chaleur dans un milieu où celle-ci est gratuite, air, eau ou processus industriel). C'est la chaleur rejetée à température plus élevée qui est utilisée. On a alors affaire à ce que l'on appelle généralement une pompe à chaleur dont les principes de fonctionnement, et souvent la technologie, sont semblables à ceux des machines frigorifiques.

Si les modes de production de froid sont fort variés, certains d'entre eux se détachent nettement des autres dans tel ou tel domaine de températures à atteindre. Ainsi, par exemple, pour les domaines de température descendant, pour les machines frigorifiques, jusqu'à  $-80^{\circ}\text{C}$ , environ, et s'élevant, pour les pompes à chaleur, jusqu'à environ  $+100^{\circ}\text{C}$ , les cycles à compression de vapeurs liquéfiables (frigorigènes) exercent une domination quasi absolue, ne laissant que très peu de place aux autres modes de production de froid comme l'absorption, l'adsorption ou les cycles thermodynamiques à gaz. En revanche, ces derniers prennent une importance majeure dans le domaine des très basses températures (cryogénie).

## I.2. Bref historique de la production de froid

- **1857** - Ferdinand Carre réalisé la première machine frigorifique à compression, la première machine à absorption à fonctionnement continu (1860). Il est également le premier à utiliser l'ammoniaque comme fluide frigorifique.
- **1876**-Charles Tellier aménagea le premier navire à cales réfrigérées, qui réussit à transporter sur le trajet Rouen Buenos Aires des viandes conservées en parfait état. [3]

### I.3. Rappel thermodynamique

La thermodynamique, branche essentielle de l'énergétique, est la science qui étudie les lois qui précèdent aux échanges d'énergie ; notamment celles qui concernent les transformations de l'énergie calorifique ou thermique en une autre forme d'énergie (mécanique, chimique, etc.)

#### I.3.1. Les principes de la thermodynamique

- **Le premier principe**

La variation de l'énergie interne  $\Delta U_{\text{systeme}}$  d'un système au cours d'une transformation est égale à la somme du travail ( $W$ ) et de la chaleur ( $Q$ ) échangés avec le milieu extérieur :

$$\Delta U_{\text{systeme}} = U_{EF} - U_{EI} = Q_{\text{échangée}} + W_{\text{échangé}} \quad (\text{Conservation d'énergie})$$

- **Le deuxième principe**

Toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation du désordre global incluant le désordre du système et le désordre du milieu extérieur. On dit encore qu'il y a création d'entropie car la fonction d'état entropie :  $S$ , est une mesure du désordre. [4]

$$dS_{\text{systeme}} = dS_{\text{échangée}} + dS_{\text{irréversible (créée)}}$$

$$dS_{\text{échangée}} = \delta Q_{\text{échangée}} / T$$

$$dS_{\text{créée}} = \delta Q_{\text{créée}} / T$$

- Si Entropie créée est **toujours positive** pour une **transformation irréversible** :

$$dS_{\text{créer irréversible}} > 0$$

- Si Entropie créée est **nulle** pour une **transformation réversible** :

$$dS_{\text{créer réversible}} = 0$$

- **Le troisième principe**

Lorsqu'elle atteint le zéro absolu - 0 degré kelvin - tout processus d'un système physique s'arrête. Lorsque nous atteignons le zéro absolu, l'entropie d'un système atteint une valeur minimale et constante. <https://lenergie-solaire.net/thermodynamique/lois-de-la-thermodynamique/troisieme-loi-thermodynamique> [4]

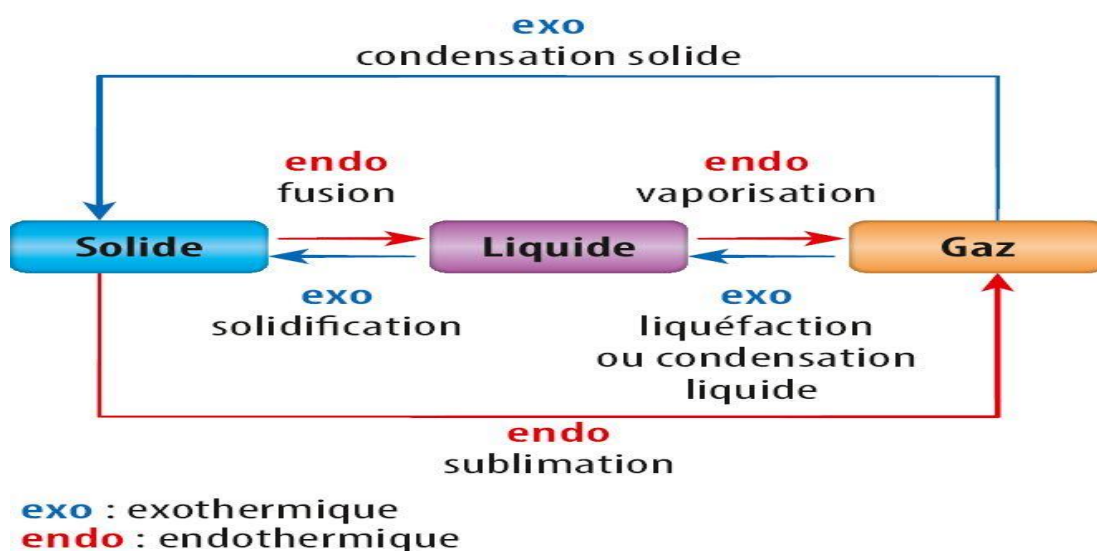
### I.3.2. Les réactions de transformation thermodynamique

- **Transformation endothermique**

Est une transformation qui absorbe de l'énergie. Un apport d'énergie est utilisé pour briser les liaisons qui existent dans les réactifs puisque ces liaisons sont plus fortes que dans les produits. Ex : fusion - vaporisation – condensation

- **Transformation exothermique**

Les liaisons qui existent dans les réactifs sont plus faibles que celles présentes dans les produits. Ainsi, un surplus d'énergie est dégagé. Ex : liquéfaction – solidification – sublimation. [5]



**Figure I.1** : Les réactions de transformation thermodynamique [40]

- Définitions de la chaleur latente

La quantité de chaleur latente est la chaleur nécessaire pour qu'une quantité de matière puisse changer son état physique à une température constante. Elle est proportionnelle à la quantité de matière (masse ou nombre de moles) et la valeur de la chaleur latente liée à ce changement d'état physique. [5]

$$Q = m \times L \text{ ou } Q = n \times L$$

Pour chaque type de matière, il existe trois types de chaleurs latentes liées aux six changements d'état physiques ( $L_s$ ,  $L_v$  et  $L_f$ ).

Où  $L_s$ ,  $L_v$  ou  $L_f$  : est la chaleur massique ou molaire associée respectivement à une sublimation, vaporisation ou fusion.

**I. 3.3. Les transformations**

| <u>transformation</u> | <u>Lois</u>                            | <u>Travail (w)</u>                         | <u>Chaleur (Q)</u>     | <u>Energie interne (<math>\Delta U</math>)</u> |
|-----------------------|--|--|------------------------|--|
| <b>Isochore</b>       | $V = \text{cst}$<br>$P/T = \text{cst}$ | $W = 0$                                    | $Q_v = n C_v \Delta T$ | $Q_v$  |
| <b>Isobare</b>        | $P = \text{cst}$<br>$V/T = \text{cst}$ | $W = -P \cdot \Delta V$                    | $Q_p = n C_p \Delta T$ | $Q_p$  |
| <b>Isotherme</b>      | $T = \text{cst}$<br>$PV = \text{cst}$  | $W = nRT \cdot \ln$<br>$(v_1/v_2)$         | $Q = -W$               | 0  |
| <b>Adiabatique</b>    | $PV^\gamma = \text{cst}$               | $W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1}$ | $Q = 0$                | $W$  |

**Tableau I.1 : Les transformations thermodynamique [70]**



### I.4. Généralités sur les chambres froides

Les chambres froides sont utilisées pour conserver les produits alimentaires dans un bon état de qualité en vue d'une consommation ultérieure.

Les chambres froides évitent :

- Les pertes de couleurs du produit.
- Les pertes de qualité du produit.
- Les pertes de valeur.
- Les pertes de poids des produits entreposés.

La fabrication et l'installation des chambres froides répondent à des normes de sécurité et d'hygiène. Les normes en vigueur sont **NF E 35-400** pour l'installation frigorifique et **NF C 15-100** pour l'installation électrique.

Le respect de cette norme a une influence primordiale sur la qualité des produits distribués et la protection du consommateur.

Les calculs d'une chambre froide doivent satisfaire à trois conditions suivant le produit à traiter :

- La température
- L'hygrométrie
- La ventilation

La grandeur physique fondamentale est La température. Ainsi existe-t-il deux types de chambres froides selon La température à l'intérieur du milieu à refroidir : les chambres froides positives et les chambres froides négatives. [6]

### I.4.1. Les chambres froides positives ou chambre de réfrigération

Les chambres froides positives permettent le maintien artificiel des produits en dessous de la température ambiante, à la température optimale pour sa conservation ; et ce au-dessus de son point de congélation.

La durée de conservation est toujours limitée .Elle est fonction de la nature du produit et de la température à laquelle il est conserve dans la chambre froide.

Les calculs de température sont établis pour une chambre froide positive de :

- en local de préparation froide, 10 a12 °C
- en local de réserve sèche, 16 à 20 °C
- en chambre de réfrigération, 0 à 8°C
- en chambre de fruits et légumes, 7 à 15°C
- en local poubelle, 9 à 11°C

[7]

La conservation en chambre froide positive freine les phénomènes vitaux des tissus vivants, tels que ceux des fruits et légumes et des tissus morts en ralentissant les métabolismes biochimiques. Elle ralentit considérablement l'évolution microbienne et les conséquences de celles-ci (putréfaction, toxines, etc....).

**HR: Humidité relative**

**D.P.C. : Durée pratique de conservation**

**J:jour**

**S: semaine**

**M:mois**

| Produits très sensible au froid |         |       |            | Produit moyennement sensible au froid |         |       |       |
|---------------------------------|---------|-------|------------|---------------------------------------|---------|-------|-------|
|                                 | °C      | HR%   | D.P.C      |                                       | °C      | HR%   | D.P.C |
| <b>Fruits</b>                   |         |       |            | Fruits                                |         |       |       |
| <b>Ananas (vert)</b>            | 10 à 13 | 85-90 | 2-4 s      | Mandarin                              | 4 à 6   |       | 4-6 s |
| <b>Ananas (mur)</b>             | 7 à 8   | 90    | 2-4 s      | Mangoust<br>An                        | 4 à 5.5 | 85-90 | 6-7 s |
| <b>Banane (verte)</b>           | 12 à 13 | 85-90 | 10-20<br>J | Pastèque                              | 5 à 10  | 85-90 | 2-3 s |
| <b>Citron (vert)</b>            | 10 à 14 | 85-90 | 1-4 m      | Légumes                               |         |       |       |
| <b>Goyave</b>                   | 8 à 10  | 90    | 2-3 s      | Haricot<br>vert                       | 7 à 8   | 92-95 | 1-2 s |
| <b>Mangue</b>                   | 7 à 12  | 90    | 3-7 s      | Pomme de<br>terre<br>(Consom.)        | 4 à 6   | 90-95 | 4-8 m |
| <b>Melon</b>                    | 7 à 10  | 85-90 | 1-12 s     | Pomme de<br>terre<br>(industries)     | 7 à 10  | 90-95 | 2-5 m |
| <b>Pamplemousses</b>            | 10      | 85-90 | 2-3 m      |                                       |         |       |       |
| <b>Papaye</b>                   | 7 à 10  | 1-3 s |            |                                       |         |       |       |
| <b>Legumes</b>                  |         |       |            |                                       |         |       |       |
| <b>Aubergines</b>               | 7 à 10  | 90-95 | 10 j       |                                       |         |       |       |
| <b>Cucumber</b>                 | 9 à 12  | 95    | 1-2 s      |                                       |         |       |       |

|                             |          |            |       |  |  |  |
|-----------------------------|----------|------------|-------|--|--|--|
| <b>Cornichon</b>            | 13       | 90-95      | 5-8 j |  |  |  |
| <b>Gingembre</b>            | 13       | 90-95      | 6 m   |  |  |  |
| <b>Gombo</b>                | 7.5 à 10 | 90-95      | 1-2 s |  |  |  |
| <b>Igname</b>               | 16       | 85-90      | 3-5 m |  |  |  |
| <b>Patatedouce</b>          | 13 à 16  | 85-90      | 4-7 m |  |  |  |
| <b>Poivron doux</b>         | 7 à 10   | 90-95      | 1-3 s |  |  |  |
| <b>Tomate<br/>(verte)</b>   | 12 à 13  | 185-<br>90 | 1-2 s |  |  |  |
| <b>Tomate<br/>(mure)</b>    | 8 à 10   | 85-90      | 1 s   |  |  |  |
| <b>Fromages</b>             |          |            |       |  |  |  |
| <b>Hollander</b>            | 12 à 15  | 85         |       |  |  |  |
| <b>Emmenthal</b>            | 10 à 12  | 80         |       |  |  |  |
| <b>Gruyere de<br/>Comté</b> | 10 à 12  | 80-85      |       |  |  |  |

**Tableau I.2 :** Conditions de conservation des produits réfrigérés pour produits très sensibles et moyenne sensibles au froid

*NB:* Les conditions de conservations peuvent varier pour un même produit suivant sa classe et selon son origine et sa variété.

### I.4-2. Les chambres froides négatives

- **La congélation**

Dans les chambres froides négatives la température d'une denrée est abaissée à un niveau tel que la majeure partie de son eau de constitution est transformée en cristaux de glace plus ou moins gros ; on parle alors de congélation. [8]

- **La surgélation**

La congélation peut être suivie d'une surgélation ou congélation rapide. La surgélation des denrées consiste à soumettre à celles-ci à l'action du froid à basse température, de façon à provoquer rapidement la cristallisation de l'eau de la denrée et abaisser sa température à une valeur suffisamment basse pour que la proportion d'eau non congelée soit très faible. Les conditions qui motivent la surgélation sont: [8]

Produits dans un très bon état de fraîcheur et d'hygiène.

- Délai avant congélation réduite
- Congélation rapide jusqu'à  $-18^{\circ}\text{C}$
- Stockage et distribution à une température supérieure à  $-18^{\circ}\text{C}$
- Vente de denrées au consommateur à l'état congelé

### I.5. Applications industrielles du froid

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

- **Production de neige carbonique** : maintien du froid à basse température ( $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

## I.6. Production de froid

### I.6.1. Généralités sur les moyens de production de froid

Il existe trois modes principaux de production de froid.

- **Mélange réfrigérant**

La dissolution de certains sels dans certains liquides nécessitant une absorption de chaleur, cette dissolution sera productrice de froid.

- **Détente d'un gaz comprimé**

La compression d'un gaz élevant sa température, réciproquement la détente d'un gaz comprimé abaissera la température du gaz détendu ; c'est sur ce principe que sont basées les machines permettant la liquéfaction des composants de l'air (azote, oxygène, néon, etc.).

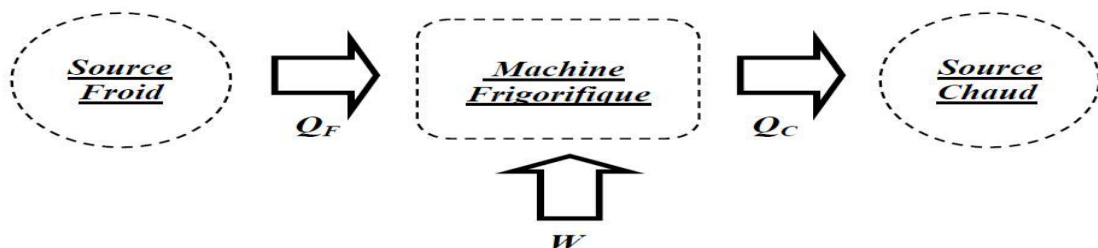
- **Evaporation d'un liquide pur**

L'évaporation d'un liquide se fait par apport de chaleur, refroidissant ainsi le milieu dans lequel il se trouve. C'est le seul moyen utilisé pour les besoins industriels en réfrigération, congélation et conditionnement d'air.

## I.7. Définition d'une machine frigorifique

Une machine frigorifique, est une machine thermodynamique destinée à maintenir un local ou un milieu à une température inférieure à celle du milieu environnant.

C'est donc un système qui transfère des calories d'un milieu à bas niveau de température vers un milieu où la température est supérieure. [9].



**Figure I.2** : Diagramme énergétique d'une machine frigorifique [41]

I.7.1. Classification des machine frigorifique

- **Machine consommant de l'énergie mécanique (système au moins ditherme)**

Grâce à l'énergie mécanique (ou équivalente)  $W$  fournie à ce système, on absorbe à la source froide, à la température thermodynamique  $T_F$ , l'énergie thermique  $Q_F$ . Au lieu de considérer les énergies, on peut s'intéresser aux puissances mises en œuvre. Du fait de la puissance mécanique fournie  $P$ , on produit, à la source froide, une puissance frigorifique  $F P$  selon le premier principe. [10]

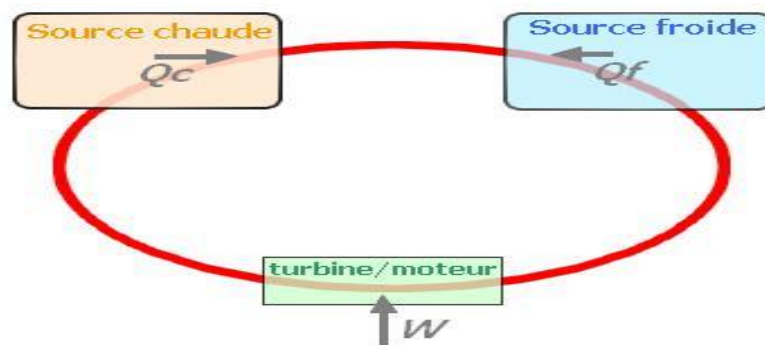


Figure I.3 : Cycle d'une machine ditherme [42]

- **Machine consommant de l'énergie thermique (système au moins trithermes)**

Outre la source froide à  $T_F$  et le puits chaud à  $T_C$ , ces systèmes, consommant de l'énergie thermique, mettent en œuvre au moins une troisième source de chaleur à  $T_M$  où la chaleur motrice leur est fournie. On a donc affaire à des systèmes (au moins) trithermes. [10]

Notons que selon le niveau thermique de cette troisième source  $T_M$ , on peut rencontrer les deux cas suivants :

✓ 1<sup>er</sup> cas :  $T_M > T_C > T_F$

✓ 2<sup>e</sup> cas :  $T_c > T_M > T_F$

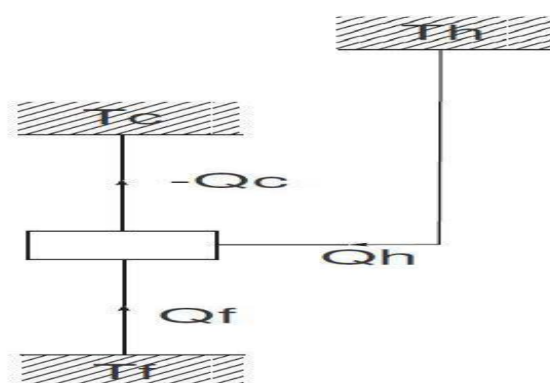


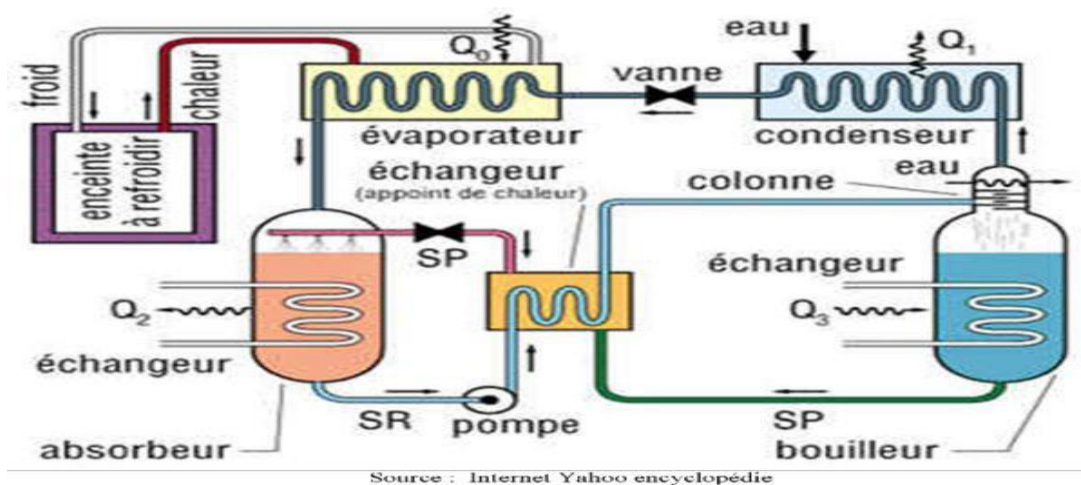
Figure I.4 : cycle tritherme. [43]

- **Machines thermo frigorifiques**

- **Machine à absorption**

Le frigorigène, dont l'évaporation produit l'effet frigorifique, repasse à l'état liquide selon un processus en trois phases (absorption par un solvant, distillation, condensation) équivalant à une compression.

Ces installations ont l'avantage d'être silencieuses et bon marché, quoique le rendement soit plus petit que les machines à compression. [11]



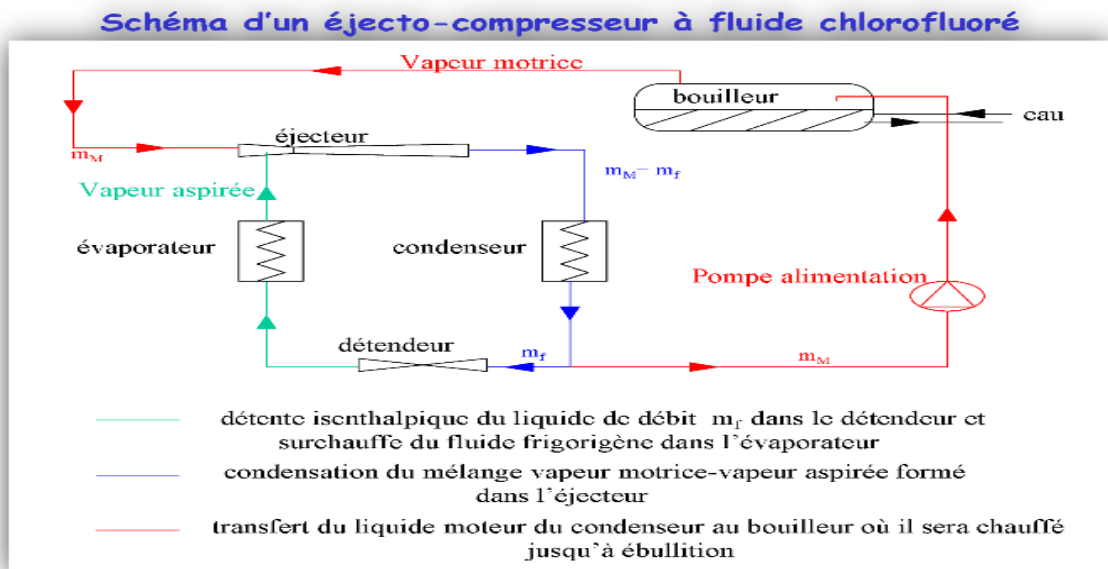
**Figure I.5** : Principe de fonctionnement d'une machine à absorption [44]

- **Machine à éjection**

Dans ce type de machines frigorifiques, le compresseur mécanique est remplacé par un éjecteur. Il est composé d'une chambre de mélange où arrive la vapeur motrice à travers une tuyère et la vapeur aspirée, mais aussi d'un diffuseur où le mélange se comprime et est éjecté vers le condenseur.

Ces installations se différencient selon les fluides chlorofluorés ou de la vapeur d'eau qu'on emploie. [11]

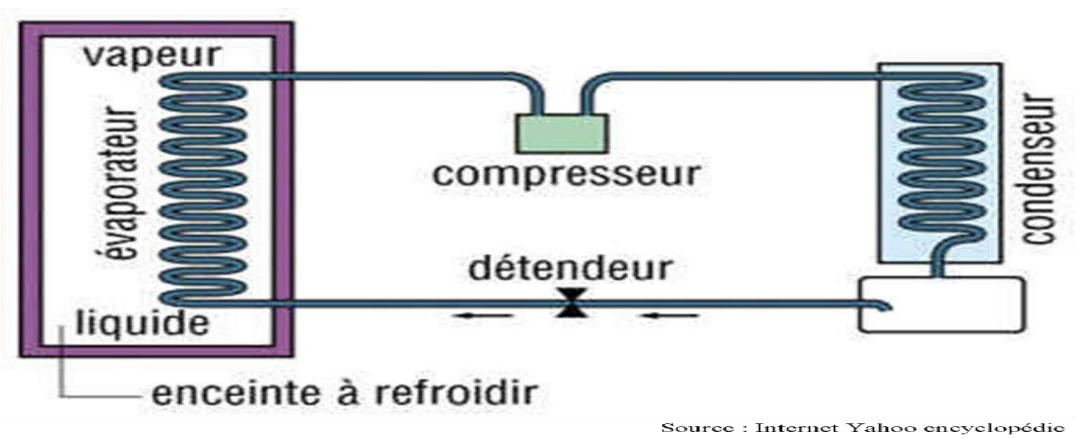




**Figure I.6** : principe de fonctionnement d'une machine à éjection [41]

➤ **Machine à compression**

La vapeur issue de l'évaporateur est aspirée par un compresseur. En raison de leur simplicité et de leur efficacité, ces machines sont les plus utilisées. Elles sont dites mono-étagées si elles utilisent un seul étage de compression. Mais si les températures à produire sont plus basses, les cycles mono-étagés présentent divers inconvénients, notamment la difficulté d'assurer une bonne étanchéité. C'est alors qu'on utilise des cycles bi-étagés. [11]



**Figure I.7** : principe de fonctionnement d'une machine à compression [45]

## I. 8.Cycle frigorifique

Le cycle frigorifique est un cycle thermodynamique. Il permet d'abaisser la température d'un milieu relativement froid (la source froide) et simultanément d'augmenter la température d'un autre milieu relativement chaud (la source chaude) au moyen d'une dépense d'énergie mécanique. [12]

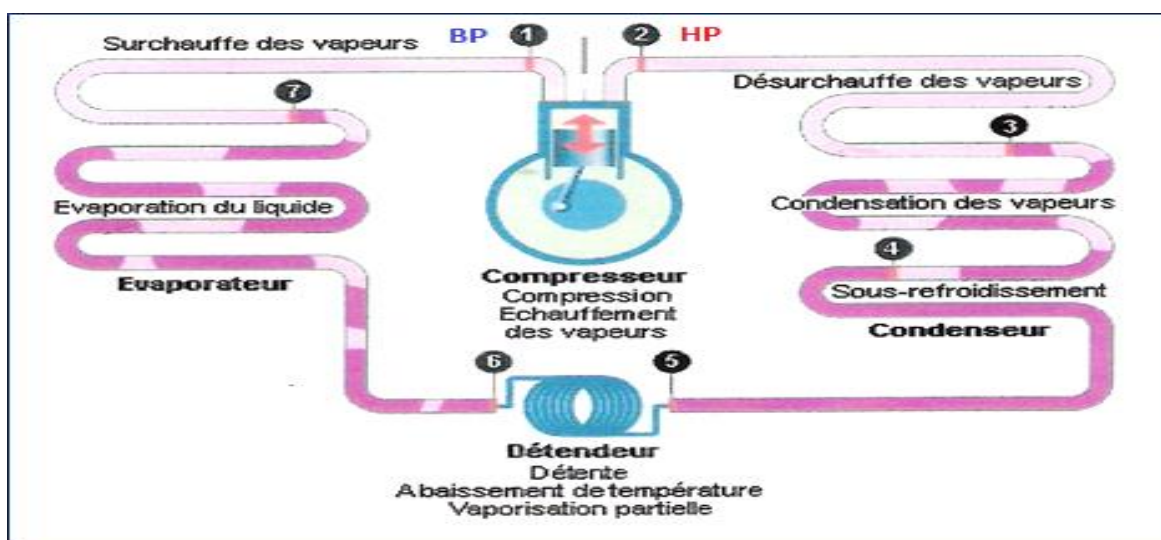
Il est notamment utilisé dans les réfrigérateurs ou les pompes à chaleur.

En thermodynamique, on appelle cycle l'ensemble des changements d'état que subit un médium donné par exemple un fluide frigorigène lorsque, partant d'un certain état, il revient après avoir subi un certain nombre de transformations. Au cours de ces changements d'état, il y a variation de ces grandeurs d'état qui sont la température, la pression et l'enthalpie [12].

Le tracé de ce cycle, appelé cycle frigorifique de Mollier, sur le diagramme (HP) est présenté dans la **Figure I.9**.

La machine frigorifique est composée de 4 organes principaux qui sont :

- le compresseur
- le condenseur
- le détendeur
- l'évaporateur

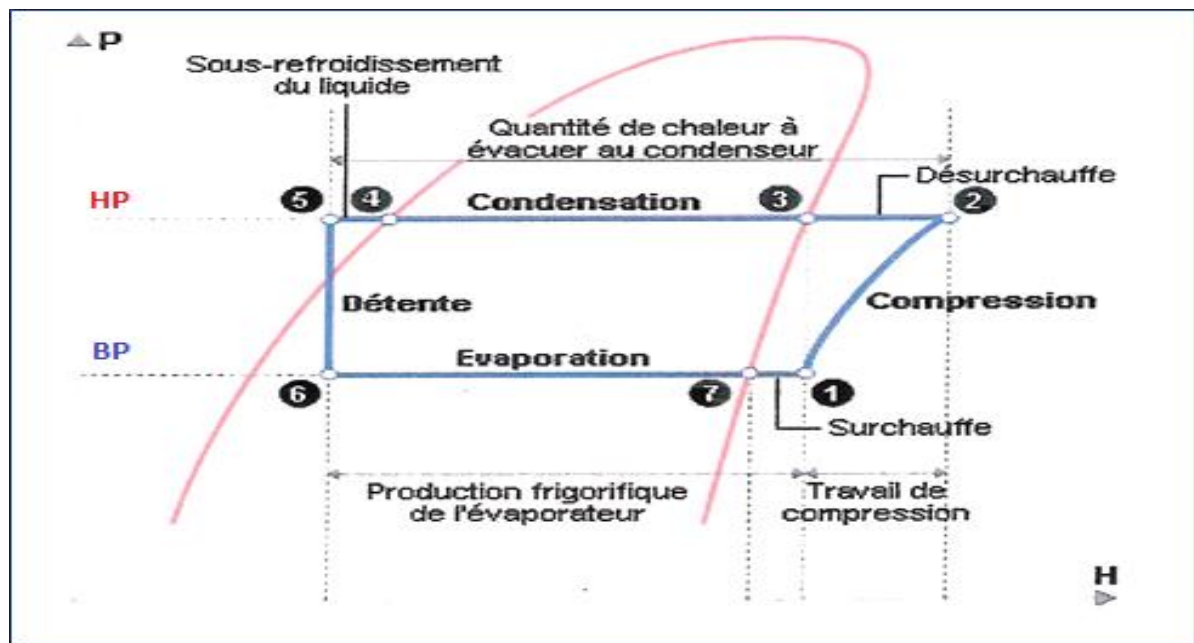


**Figure I.8** : schéma-type d'un cycle frigorifique [46]

➤ **Description du cycle**

Le fluide frigorigène circulant dans ce circuit parcourt un cycle comporte 4 étapes principales à savoir :

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



**Figure I.9** : cycle frigorifique de Mollier, sur le diagramme (HP) [46]

➤ **Transformations thermodynamiques subies par le fluide au cours du cycle**

1→2 : compression isentropique

2→3 : désurchauffe (isobare)

3→4 : condensation isotherme

4→5: sous refroidissement

5→6: détente isenthalpique

6→7 : évaporation isotherme

7→1' : surchauffe dans l'évaporation

1'→1 : surchauffe dans la tuyauterie d'aspiration.

- **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.

- **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.

- **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 œuvre 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.

- **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 désurchauffer 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. [12]

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.

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

**Tableau I.3 :** Reprenant les différentes caractéristiques du fluide selon son emplacement dans le cycle

**I.9.Coefficients de performance**

Pour caractériser l'efficacité d'une machine frigorifique ou d'une pompe à chaleur, on considère, respectivement :

➤ **Coefficient de performance frigorifique**

$$COPF = \frac{\text{Froid produit à la source froide}}{\text{Energie apporté au system}} \dots\dots\dots (I.1)$$

➤ **Coefficient de performance calorifique**

$$COPC = \frac{\text{Chaleur dégagée au puits chaud}}{\text{Energie apporté ausystem}} \dots\dots\dots (I.2)$$

## I.10. Les fluides frigorigènes

Les fluides frigorigènes sont les substances qui évoluent dans les circuits des systèmes frigorifiques en produisant du froid grâce aux phénomènes endothermiques mis en œuvre par les transformations thermodynamiques qu'ils subissent, généralement la vaporisation dans l'évaporateur d'une machine frigorifique. Les pompes à chaleur utilisent, elles aussi, des substances semblables pour la production de chaleur par l'utilisation d'un phénomène exothermique, le plus souvent la liquéfaction de vapeurs dans un condenseur.

Suite aux problèmes environnementaux et à la crise énergétique, l'industrie des machines frigorifiques et des pompes à chaleur, poussée par les gouvernements, a aujourd'hui le devoir de trouver des remèdes aux maux modernes. Elle y parviendra en développant de nouveaux fluides frigorigènes et des équipements toujours plus efficaces. En effet, suite aux nouvelles restrictions concernant les fluides de synthèse, les fluides naturels tel que le CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> apparaissent aujourd'hui comme une alternatives prometteuses tant dans les applications de climatisation que dans les applications de chauffage et de production d'eau chaude.

Donc les fluides frigorigènes ont pour rôle d'assurer les transferts de chaleur entre l'évaporateur et le condenseur de la machine. Ils évoluent cycliquement dans le circuit de la machine absorbant de la chaleur dans l'évaporateur et en cédant de la chaleur dans le condenseur. [13]



Figure I.10 : Les fluides frigorigènes [47]

---

On distingue parmi les gaz réfrigérants différentes catégories de molécules :

- les chlorofluorocarbures (CFC)
- les hydro chlorofluorocarbures (HCFC)
- les hydrofluorocarbures (HFC)
- les per fluorocarbures (PFC) ou hydrocarbures per fluorés
- les hydrocarbures ou composés organiques ne faisant pas partie des catégories précédemment citées
- les composés inorganiques comme l'ammoniac
- le CO<sub>2</sub>, abandonné lors de la découverte des gaz fluorés et de leurs propriétés, mais de nouveau utilisé aujourd'hui.
- le R718 (eau)
- le R728 (air)

### I. 10.1. Les classes de réfrigérants

Les fluides frigorigènes sont identifiés par une numérotation qui est définie par le standard **ASHRAE 34** et par la norme internationale **ISO 817**.

Elle concerne aussi bien les fluides halogénés que les fluides naturels. [13]

Les fluides frigorigènes actuellement utilisés peuvent être subdivisés en quatre groupes principaux :

- Les substances inorganiques pures
- Les substances organiques (les hydrocarbures)
- Les hydrocarbures halogénés
- Les autres produits



- **Les substances inorganiques pures**

Les fluides de cette famille sont principalement composés :

- **L'ammoniac (R717)**

L'ammoniac est l'un des premiers fluides utilisés et a toujours donné satisfaction. Sa toxicité et son inflammabilité impliquent une utilisation en système indirect pour les applications dans les domaines résidentiel et commercial. L'ammoniac ne peut être utilisé que pour des installations frigorifiques de grandes envergures (entrepôt, brasserie etc.).

- **L'eau (R718)**

C'est un frigorigène parfaitement sûr pour l'homme. Malheureusement, il ne permet pas de produire de basses températures (point triple de l'eau aux environs de 273.16 K). Il est préférable de l'utiliser pour le froid climatique ou pour les pompes à chaleur à haute température (100 à 300°C) à cause de son point critique qui est très élevé. Cependant, la pression de vapeur de ce fluide est très faible et elle nécessite des compresseurs pouvant aspirer des grandes quantités d'eau. [13]

L'eau est plus adaptée pour la production de froid par absorption.

- **Le dioxyde de carbone (R744)**

Le CO<sub>2</sub> (R744) a été utilisé comme un fluide frigorigène malgré sa température critique relativement basse. Les points de fonctionnement de ce fluide sont proches du point critique.

Son coût est très faible. Le R744 a été utilisé pour des installations de réfrigération de la marine et dans l'industrie car il est ininflammable (il est utilisé comme agent d'extinction des feux).

Les excellentes propriétés de transferts thermiques du CO<sub>2</sub> constituent un avantage mais son utilisation est réduite à l'étage basse pression des systèmes en cascade, d'où le nombre limité d'applications industrielles. [13]

| Les fluides inorganiques purs | L'ammoniac      | L'eau            | Le dioxyde de carbone |
|-------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| <b>Codification</b>           | R717            | R718             | R744                  |
| <b>Composition chimique</b>   | NH <sub>3</sub> | H <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub>       |

**Tableau I.4 :** Les fluides inorganiques purs

- **Les fluides 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 sont les plus utilisés. 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 fluides organiques hydrocarbures | Butane                         | Isobutane                      | propane                       | Cyclopropane                  | propylène                     |
|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>Codification</b>                  | R600                           | R600a                          | R290                          | RC270                         | R1270                         |
| <b>Composition chimique</b>          | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> |

**Tableau I.5 :** Les fluides hydrocarbures

- **Les 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.

Les fluides frigorigènes du groupe du halo carbures, c'est-à-dire les CFC, les HCFC et les HFC, sont les plus répandus au monde. Ceux-ci ont comme éléments principaux des atomes

de carbone et de fluor ainsi que, selon le cas, des atomes d'hydrogène et/ou de chlore. La proportion de ces atomes dans la molécule détermine les propriétés physiques du réfrigérant.

| CFC  | HCFC  |       | HFC   |       |
|------|-------|-------|-------|-------|
| R11  | R21   | R401A | R32   | R404A |
| R12  | R22   | R402A | R125  | R407C |
| R113 | R123  | R408A | R134a | R410A |
| R115 | R124  | R409A | R143a | R507  |
| R502 | R142b |       | R152a |       |

Tableau I.6 : Les fluides hydrocarbures halogénés

- **Mélanges des fluides (zéotropiques et azéotropiques)**

Les corps halogénés (CFC, HCFC et HFC) sont utilisés à l'état pur ou en mélange. Dans le cas des mélanges, nous avons les **mélanges zéotropes** et les **mélanges azéotropes** :

- **Un mélange zéotropique (série 400)**

est un mélange de réfrigérant qui ne se comporte pas comme un fluide homogène lors de la condensation respectivement l'évaporation : les différentes composantes peuvent changer d'état de manière indépendante, changeant les propriétés thermodynamiques du mélange (mélange dont la composition en phase vapeur et en phase liquide diffèrent lorsque les deux phases coexistent) d'où l'existence d'un « glissement », à savoir qu'à une pression donnée, la température varie suivant le titre en vapeur du mélange diphasique. Ceci peut causer le dysfonctionnement de l'installation ainsi que des problèmes de remplissage en cas de fuite.

On caractérise un mélange azéotrope (binaire, ternaire ou plus) par la valeur de son glissement à une pression d'utilisation (celle d'évaporation ou de condensation).

La série des 400 est attribuée aux mélanges zéotropiques. Les numéros d'identification sont les numéros d'ordre d'enregistrement des mélanges.

Ainsi, le R410 A est composé, en fraction massique, de 50% de R125 et 50% de R32, et le R410 B est composé de 55% de R125 et 45% de R32.

➤ **Un mélange azéotropique (série 500)**

se dit d'un mélange de réfrigérant qui se comporte comme un fluide homogène (corps pur) lors de la condensation respectivement l'évaporation. Celui qui a été très utilisé est le R502 (un CFC). De plus, lorsqu'un mélange azéotrope présente un glissement faible (inférieur à 1°C), on parle alors de fluide quasi-azéotropique mais on le classe néanmoins toujours dans la catégorie des fluides azéotropes (c'est le cas du R404A dont le glissement de température à 1 atm est de 0,9°C). Enfin lorsqu'un mélange azéotrope présente un glissement encore plus faible (inférieur à 0,3 °C), il est usuel de l'appeler fluide azéotrope (c'est le cas du R410A dont le glissement à 1 atm est inférieur à 0,1°C). [13]

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

- **Famille des autres fluides**

Les fluides de cette famille sont utilisés de façon très ponctuelle et rare. Ainsi on pourra trouver :

- Les éthers oxydent
- Les amines aliphatiques
- Les alcools, le méthanol et l'éthanol
- Les composés tri halogénés, fluorés chlorés et bromés (HBCFC, BCFC)

### **I.10.2. Les séries de fluides frigorigènes**

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

➤ **SERIE 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.

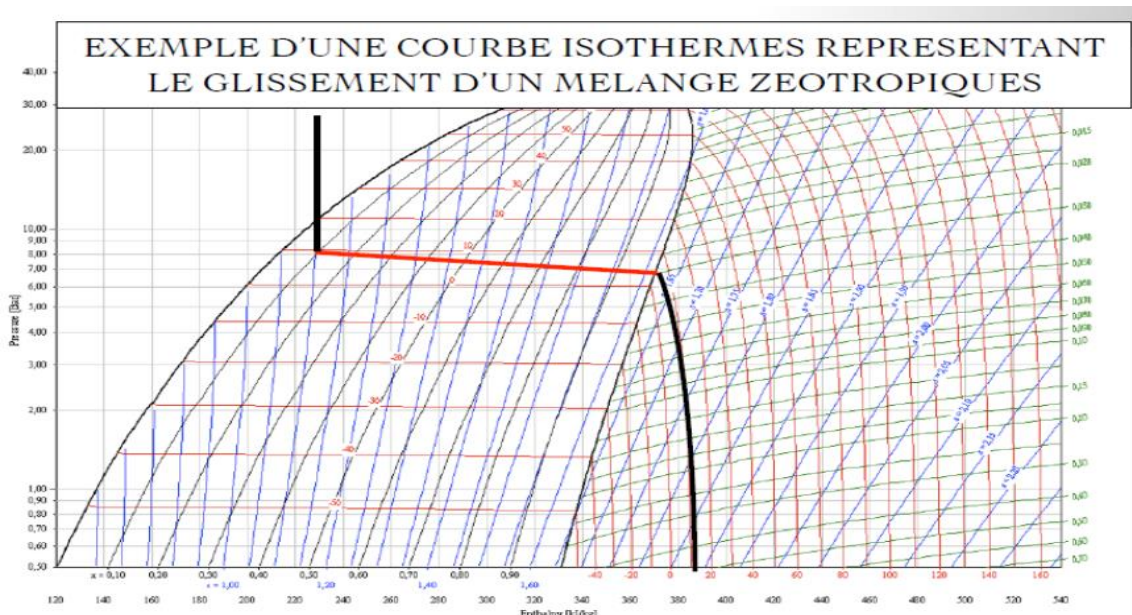
Exemples de mélanges :

- 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).



➤ **SERIE 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.

➤ **SERIE 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)

➤ **SERIE 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),
- R744 (masse molaire du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, 44g/mol)

Série des fluides inorganiques

Fluide Réfrigérant

**R 717**

masse molaire de l'ammoniac 17g/mol

Dans le Tableau I.1, nous avons rassemblés, pour les fluides frigorigènes soit les plus couramment utilisés (dans des installations neuves ou anciennes) soit en études de développement, la température d'ébullition, la température et la pression critiques ainsi que les valeurs de l'ODP et du GWP.

| Réfrigérant           | Formule                           | Masse<br>Molaire<br>g/mol | Tb<br>°C | Tc<br>°C | Pc<br>MPA | ODP   | GWP  |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------|----------|-----------|-------|------|
| HFC-32                | CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>    | 52.02                     | -51.7    | 78.1     | 5.78      | 0     | 650  |
| HFC-125               | CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>  | 120.02                    | -48.1    | 66.2     | 3.63      | 0     | 2800 |
| HFC-134a              | CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>  | 102.02                    | -26.1    | 101.1    | 4.06      | 0     | 1300 |
| HFC-143a              | CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>   | 84.04                     | -47.2    | 72.9     | 3.78      | 0     | 3800 |
| HFC-152a              | CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>  | 66.05                     | -24.0    | 113.3    | 4.52      | 0     | 140  |
| HCFC-123              | CHCl <sub>2</sub> CF <sub>3</sub> | 152.93                    |          | 183.8    | 3.66      | 0.014 | 90   |
| HCFC-124              | CHClFCF <sub>3</sub>              | 136.48                    | -12      | 122.3    | 3.62      | 0.03  | 470  |
| <b>Mélange de HFC</b> |                                   |                           |          |          |           |       |      |
| R-404A                | R-125/143a/134a (44/52/4)         | 97.6                      | -46.6    | 72.1     | 3.74      | 0     | 3260 |
| R-407 A               | R-32/125/134a (20/40/40)          | 90.11                     | -45.2    | 81.9     | 4.49      | 0     | 1770 |
| R-407B                | R-32/125/134a (10/70/20)          | 102.94                    | -46.8    | 74.4     | 4.08      | 0     | 2290 |
| R-407C                | R-32/125/134a (23/25/52)          | 86.20                     | -43.8    | 87.3     | 4.63      | 0     | 1530 |
| R-407D                | R-32/125/134a (15/15/70)          | 90.96                     | -39.4    | 91.6     | 4.48      | 0     | 1360 |

|                            |   |       |       |       |      |   |      |
|----------------------------|---|-------|-------|-------|------|---|------|
| R-407 <sup>E</sup>         | R-32/125/134a (25/15/60)  | 83.78 | -42.8 | 88.8  | 4.73 | 0 | 1360 |
| R-410A                     | R-32/125(50/50)   | 72.58 | -51.6 | 72.5  | 4.95 | 0 | 2100 |
| R-507 A                    | R-125/143a (50/50)  | 98.86 | -47.1 | 70.9  | 3.79 | 0 | 3300 |
| <b>Hydrocarbures</b>       |   |       |       |       |      |   |      |
| RC-270                     | CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub><br>(cyclopropane)             | 42.08 | -33.5 | 125.2 | 5.58 | 0 |      |
| R-290                      | CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> (propane)                     | 44.10 | -42.1 | 96.7  | 4.25 | 0 | -20  |
| R-600                      | CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub><br>(butane) | 58.12 | -0.5  | 152   | 3.80 | 0 | -20  |
| R-600a                     | CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub> (éthane)                   | 30.07 | -11.6 | 134.7 | 3.64 | 0 | -20  |
| R-170                      | CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> (propylène)                                   | 42.08 | -88.6 | 32.2  | 4.87 | 0 | -20  |
| R-1270                     | CH <sub>3</sub> CH=CH <sub>2</sub>  |       | -47.7 | 92.4  | 4.67 | 0 |      |
| <b>Fluides inorganique</b> |   |       |       |       |      |   |      |
| R-718                      | H <sub>2</sub> O (eau)  | 18.02 | 100   | 374.2 | 22.1 | 0 | <1   |
| R-744                      | CH <sub>2</sub> (dioxyde de carbone)  | 44.01 | -78.4 | 31.1  | 7.38 | 0 | 1    |
| R-717                      | NH <sub>3</sub> (ammoniac)  | 17.03 | -33.3 | 132.3 | 11.3 | 0 | <1   |

**Tableau I.7 : Fluides frigorigènes**



### I.10.3. Critère de choix d'un fluide

Divers **fluides frigorigènes** sont utilisés dans l'application des machines frigorifiques et des pompes à chaleur, le choix du fluide étant effectué en tenant compte des problèmes thermiques particuliers ainsi que d'un certain nombre de **critères** : thermiques, physiques, chimiques et économiques.

- **Critères thermodynamiques**

- Bonnes propriétés thermodynamiques en général.
- La température de condensation doit toujours être très inférieure à la température critique du fluide frigorigène.
- La quantité de froid massique produite doit être la plus élevée possible, elle dépend de la pression d'aspiration.
- Puissance frigorifique volumétrique élevée.
- Point de congélation basse.
- Taux de compression inférieur à 10 (pression condensation/pression évaporation).
- Pression adaptée aux matériels et aux conditions d'utilisation
- Miscibilité avec le lubrifiant.
- Stabilité chimique et thermique [14]

- **Critères environnementaux**

- Action sur la couche d'ozone, cette couche permet d'arrêter en partie les rayons ultraviolets, le chlore contenu dans certains fluides frigorigènes détruit cette couche d'ozone. Un coefficient nommé ODP dont la référence est le R11 a été défini pour l'ensemble des fluides, ce coefficient doit être le plus faible possible.
- Action sur l'effet de serre (réchauffement climatique), Le GWP (ou PRG = Potentiel de Réchauffement global) est une indication sur la nocivité d'un gaz par rapport à l'effet de serre.
- Inflammabilité.
- Toxicité.

- **Critères techniques**

- Action sur les métaux doit être faible ou nulle
- Action sur les matières plastiques et élastomères doit être faible.
- Stabilité thermique.

- **Critères technologiques, opérationnels et économiques**

- Masse volumique du liquide élevé = compacité.
- Pression maximale de fonctionnement : modérée et  $> P_{ATM}$ .
- Propriétés aérauliques et thermiques : viscosité faible et conductivité thermique élevée.
- Compatibilité (huile ; matériaux ; stabilité chimique et thermique).
- Cout et disponibilité

- **Critères Physiques**

- une pression d'évaporation supérieure à la pression atmosphérique ce qui permet une détection plus aisée de fuites éventuelles et empêche l'air et l'eau de pénétrer dans le circuit. .
- une faible température d'ébullition afin d'éviter d'installer un vide poussé pour obtenir l'ébullition.
- un faible volume spécifique de la valeur saturé, ce qui augmentera la production de frigories, pour un même volume de vapeur aspiré par le compresseur.
- une pression de condensation modérée ce qui assure une meilleure sécurité des joints dans la partie haute-pression et un meilleur rendement volumétrique du compresseur.
- une température critique élevée pour éviter l'emploi de récipients à parois épaisses.
- l'ininflammabilité, l'inexplosibilité et le non toxicité.
- une température de refoulement du compresseur (caractéristique intrinsèque de chaque fluide pour des conditions de fonctionnement données) relativement basse pour une plus grande longévité du compresseur.

- **Critères thermique**

- une chaleur latente de vaporisation élevée.
- une forte chaleur spécifique à l'état vapeur [15].

**I.10.4. Caractéristiques thermodynamiques du fluide**

- **Température d'ébullition**

On s'arrangera pour que, dans la mesure du possible, la température d'évaporation soit supérieure à la température d'ébullition normale. De cette façon si le critère est respecté, la totalité du circuit est en surpression vis-à-vis de l'extérieur et l'on ne risque pas l'introduction d'air et d'eau.

- **Température critique**

La température de condensation doit toujours être inférieure à la température critique.

Le rendement du cycle de la machine se dégrade lorsque l'on se rapproche de la température critique. Plus la température critique est basse, plus l'efficacité du système frigorifique décroît.

- **Pressions du cycle frigorifique**

La pression de condensation ne doit pas excéder 20 à 25 bars .Inversement, la pression d'évaporation ne doit pas être trop basse.

Pour garder une bonne efficacité au compresseur, le taux de compression doit rester limite. Les taux de compression importants entraînent l'échauffement du fluide, donne un mauvais rendement et la consommation énergétique augmente. Le taux de compression varie avec le fluide frigorigène pour les mêmes températures de condensation et d'évaporation.

- **Volume massique à l'aspiration du compresseur**

S'il est élevé, il conduit à des débits volumes aspirés importants, d'où la nécessité de recourir à des compresseurs plus importants, donc plus chers.

## I.11. Isolation des chambres froides

### I.11.1 Généralités sur l'isolation

L'isolation permet de diminuer le cout de frigories produites, les isolants limitent les échanges thermiques entre le milieu extérieur et le milieu intérieur. Une bonne isolation s'impose donc pour le container afin de réduire les apports thermiques.

Un bon isolant doit :

- avoir une faible densité
- avoir une très faible conductivité thermique
- avoir une bonne résistance a la diffusion de la vapeur
- être non hygroscopique
- être imputrescible
- être résistant, et stable entre certaines limites de température
- être ininflammable
- être sans action sur le fer ou les matériaux en contact
- être d'un prix raisonnable
- conserver constante dans le temps, ses qualités d'isolation

La performance de l'isolation augmente si l'isolant contient une certaine quantité d'air car l'air est le meilleur isolant s'il est sec et au repos  $\lambda=0.020\text{W/m.K}$ , la grandeur qui permet de mesurer la qualité d'un isolant est la conductivité thermique en  $\text{W/m.K}$  ou  $\text{W/m. }^\circ\text{C}$ . [16]

### I.11.2 La conductivité thermique ou coefficient de conductibilité des matériaux

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) intervient dans la formulation de la loi de Fourier pour la conduction de la chaleur. Pour un système unidimensionnel, on a la relation :

$$Q = -\rho s \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.1})$$

Q: Flux de chaleur en watt

$S$  : surface perpendiculaire à la direction en  $m^2$

$dT$  : Gradient de température suivant  $x$  (K/m)

$\lambda$  : Conductivité thermique du corps en  $W/m.K$

Elle est la grandeur introduite pour quantifier l'aptitude d'un corps à conduire de la chaleur. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de temps et par unité de surface sous l'action d'un gradient de température entre les deux extrémités d'une paroi quelconque.

Elle dépend essentiellement de la nature du matériau, la valeur de  $\lambda$  varie avec la température, mais en pratique on la considère souvent comme constante. La conductivité thermique détermine le choix de l'isolant, plus  $\lambda$  est faible plus on a une bonne isolation, pour les isolants  $\lambda$  varie de 0.025 à 0.093. [16]

- **Les normes d'isolation**

L'isolation d'une chambre froide a une importance capitale sur le fonctionnement général de l'installation. Trop faible, elle facilite l'entrée de chaleur par conduction à travers les parois et l'augmentation du temps démarrage du compresseur.

L'isolation doit limiter le coefficient global de transmission thermique à  $0.36W/m.^{\circ}C$

A travers toutes les parois du container. [16]

- **Isolation traditionnelle**

L'isolant généralement utilisé est le polystyrène (sous forme de plaques ou de feuilles).

Lorsque l'épaisseur de l'isolation est supérieure à 8 cm (voir 10 cm dans certains cas), il est adopté une seule couche d'isolation ; dans le cas contraire, il est adopté deux couches d'isolation à joints croisés. [17]

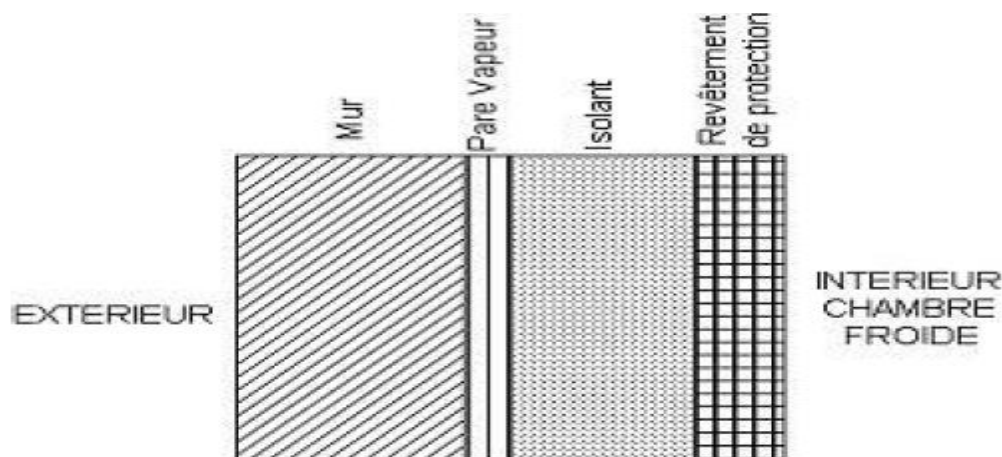
|  | Fibre de verre | Polystyrène | Polyuréthane |
|--|----------------|-------------|--------------|
| <b>Coefficient d conductibilité thermique <math>\lambda</math></b><br>( $w/m. ^{\circ}C$ ) | 0.03           | 0.03        | 0.024        |

**Tableau I.8** : coefficients de conductibilité thermique des isolants utilisés pour les murs des chambres froides traditionnelles

L'isolant doit être protégé contre les chocs, le revêtement classique utilisé est l'enduit grillagé.

Il s'agit de grillage à mailles hexagonales (mailles de 25 mm) fixé contre l'isolant par des étriers et recouvert par un enduit ciment.

Pour les grandes chambres froides, il peut être mis en œuvre de la tôle en acier nervurée. Le plafond n'est généralement pas protégé à cause du faible risque de chocs. [17]



**Figure I.11:** Composition de la paroi d'une chambre froide traditionnelle [48]

- **Panneaux préfabriqués**

Les panneaux préfabriqués utilisés dans les chambres froides sont constitués d'un isolant (polyuréthane) dont les faces sont intimement collées à deux feuilles résistantes :

- tôle en acier galvanisé (1 mm)
- Alliage d'aluminium
- Acier inoxydable
- Stratifié verre - polyester (3 à 4 mm)
- Contreplaqué qualité marine (10 mm)

L'assemblage des panneaux pour la constitution de la chambre froide est effectué sur le site.

Les panneaux préfabriqués sont des panneaux sandwich à âme isolante en polyuréthane avec des épaisseurs variant de 60 à 200 mm. [17]

**Chapitre. II**  
**Equipement d'une chambre  
froide**

Dans ce chapitre nous avons parlé d'une façon générale des différents équipements des composants d'une installation frigorifique.

### II.1. Fonctionnement d'une chambre froide

Une **chambre froide** vous permet de respecter la chaîne du froid de vos produits grâce à son mode de **fonctionnement**. Vous pouvez ainsi les conserver vos produits à basse température sur une courte ou une longue période. L'installation d'une chambre froide dans votre établissement est une nécessité surtout si vous devez entreposer des denrées alimentaires, mais aussi d'autres produits. [18]

Les chambres froides sont des chambres réfrigérées qui permettent aux professionnels de conserver leurs produits de façon à ce que la chaîne de froid soit maintenue. Les produits qui peuvent être conservés dans les chambres froides sont variés comme la viande, les poissons, les produits de laboratoire, les légumes et les fruits. Il existe deux catégories de chambres froides : la chambre froide positive et la chambre froide négative. Elles peuvent être commandées sur-mesure suivant le volume nécessaire pour bien conserver les produits. Il convient cependant de bien connaître le **fonctionnement** d'une **chambre froide** pour pouvoir bien l'utiliser. [19]

Dans une chambre frigorifique, deux choses sont indispensables : le groupe de réfrigération et les fluides frigorigènes. Ces derniers servent de fluide caloporteur et permettent l'échange de chaleur entre elle et le groupe de réfrigération dont elle est équipée. Les systèmes de production de froid négatif et positif ou de production de chaleur en font tous usage. Peu importe le système utilisé, le circuit de réfrigération fonctionne à peu près de la même manière. [19]

Une **chambre froide** peut être négative ou positive. Elle est équipée d'un groupe froid dont le **fonctionnement** repose sur la capacité des fluides réfrigérants à se condenser, suivant la pression, à différentes températures ou à s'évaporer. Le principe de fonctionnement d'une chambre froide est identique à celui d'un réfrigérateur avec des contraintes techniques plus importantes et une puissance plus élevée. [18]





**Figure II.1** : Chambre froide [49]

- **Quel groupe frigorifique pour votre chambre froide ?**

Le groupe frigorifique étant un élément clé de votre chambre froide, il doit être sélectionné avec grand soin. Deux choix s'offrent à vous : l'équiper de groupe monobloc ou bien d'un groupe bibloc.

- **Monobloc** : groupe constitué d'un seul bloc à placer sur l'une des parois de votre chambre froide.
- **Bibloc** : groupe constitué de deux blocs à placer distinctement à l'intérieur de la chambre froide et à l'extérieur.

Un groupe frigorifique émet du bruit et de la chaleur lors de son **fonctionnement**, le modèle monobloc peut s'avérer, de ce fait, moins confortable pour les utilisateurs de la **chambre froide** par rapport au modèle bibloc. [20]

La chambre froide Positive est composée de deux parties bien distinctes:

- le circuit frigorifique et
- les panneaux de chambre froide (l'enceinte).

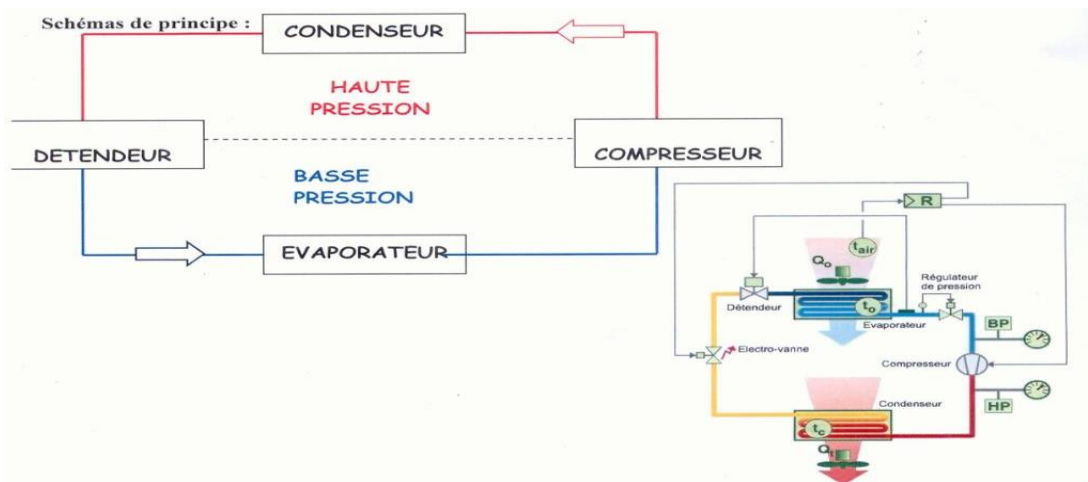
L'expression : « faire du froid » est fautive, il est impossible de faire du froid pour faire diminuer la température.

En vérité on absorbe de la chaleur.

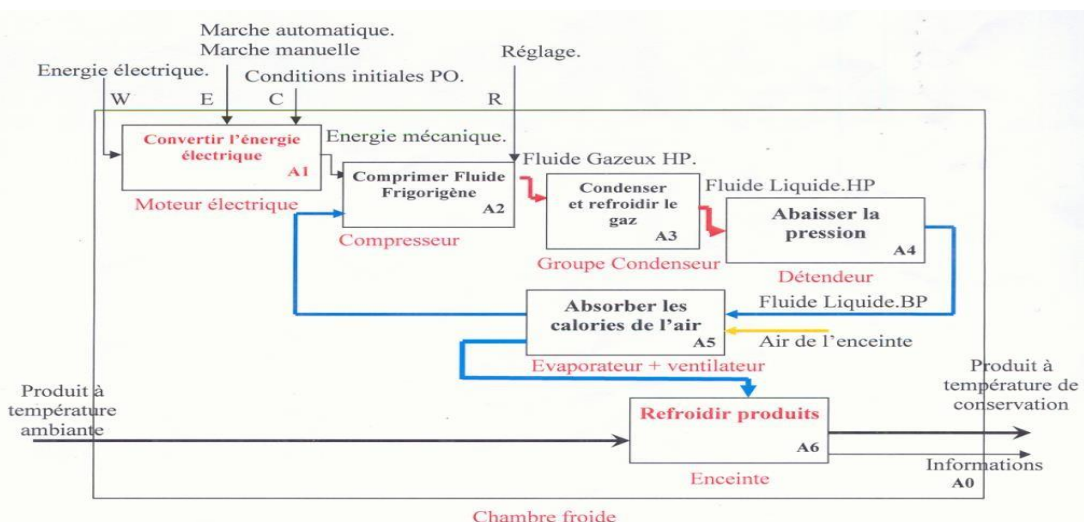
Le groupe moto compresseur absorbe et refoule le gaz frigorigène dans toute l'installation frigorifique de la chambre froide.

Il est théoriquement divisé en deux parties "HP" haute pression est la partie chaude du circuit et la0 partie "BP" la partie froide de l'installation. [21]

• **Schéma de principe**



• **Fonctions principales**



## II.2. Principaux composants d'une chambre froide

Le principe de fabrication de froid repose sur l'évaporation d'un liquide pur appelé fluide frigorigène.

Une installation de base se compose alors des quatre organes principaux :

### Appareils principaux :

- Le compresseur 1.
- Le condenseur 2.
- Le détendeur 3.
- L'évaporateur 4.

### Appareils annexes :

- Le séparateur d'huile 5.
- Le réservoir de liquide condensé 6.
- Le déshydrateur 7.
- Le voyant 8.
- La bouteille d'aspiration 9.
- Le filtre d'aspiration 10.

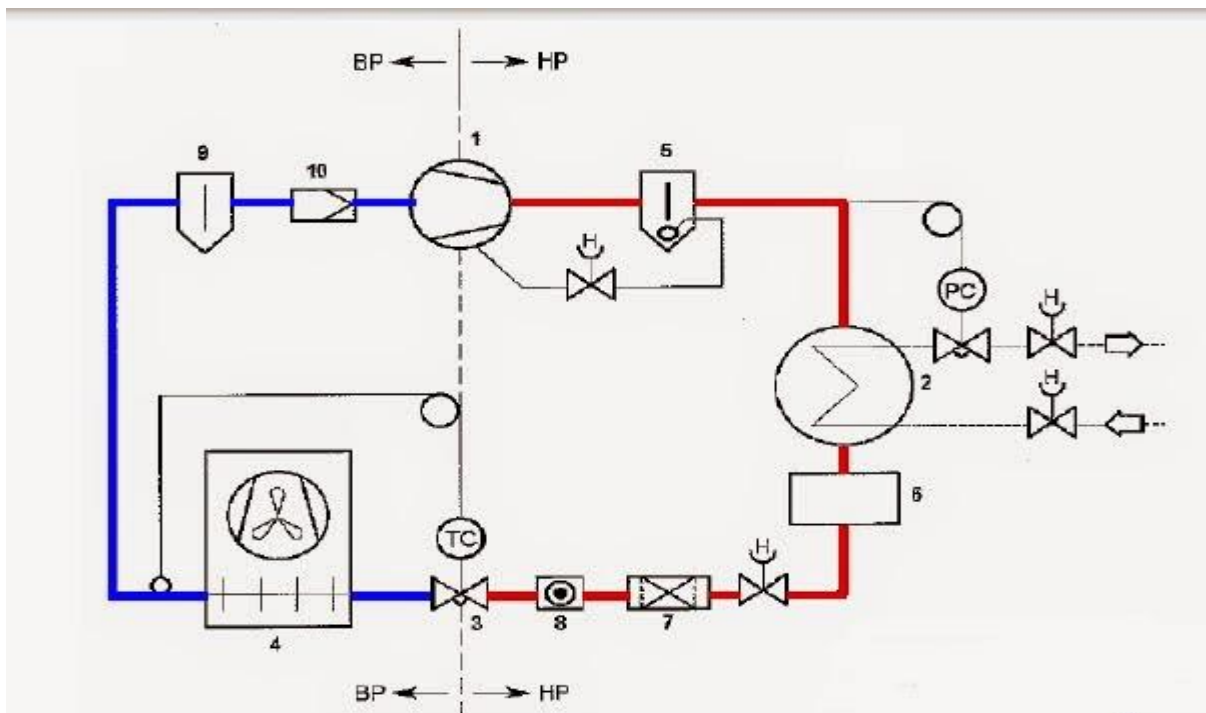


Figure II.2: Schéma d'une installation frigorifique. [50]

### II.3. Comment le froid s'obtient-il?

Le fluide frigorigène est aspiré par le compresseur sous forme de gaz basse pression.

Au passage dans celui-ci, il évolue de basse pression en haute pression.

Il arrive au condenseur et, refroidi par l'air qui y circule à contre-courant, il change progressivement d'état pour être complètement liquide à la sortie.

Dans le condenseur, le fluide frigorigène libère de la chaleur en se condensant.

Le passage dans le détendeur fait chuter sa pression et par voie de conséquence, sa température.

Il est à l'état liquide basse pression.

En cheminant dans l'évaporateur, il s'évapore en absorbant la chaleur du milieu à refroidir.

Il fournit donc du froid.

Le fluide frigorigène se trouve à l'état vapeur basse pression, pour revenir au compresseur et recommencer son cycle.

Au niveau de l'**évaporateur**, on absorbe les calories du milieu dans lequel il se trouve. Le fluide frigorigène à basse pression et température négative va s'évaporer au contact de l'air ambiant en absorbant les calories du milieu.

Le **compresseur** comprime le gaz issu de l'évaporateur pour le porter à haute pression ce qui fait monter sa température. Le compresseur est actionné par un moteur électrique dont la consommation est directement liée à la différence de pression HP – BP).

Au niveau du **condenseur**, on évacue les calories absorbées à l'évaporateur et produites pendant la phase de compression. Lors de cet échange de chaleur, le fluide frigorigène passe de l'état gazeux à l'état liquide. Le **détendeur** fait passer le liquide de haute pression à basse pression. La température du fluide va chuter (température négative).

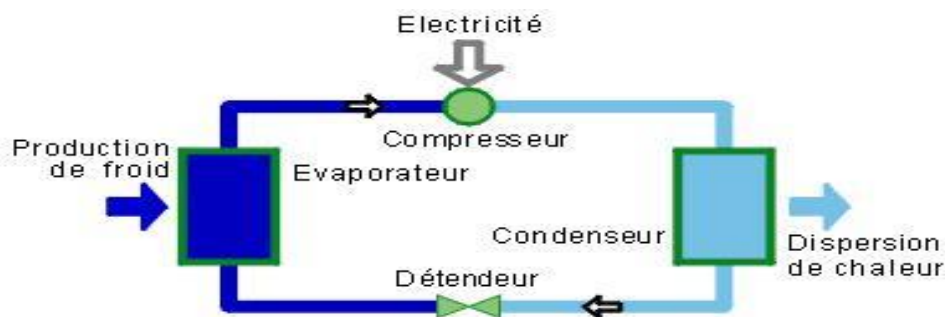
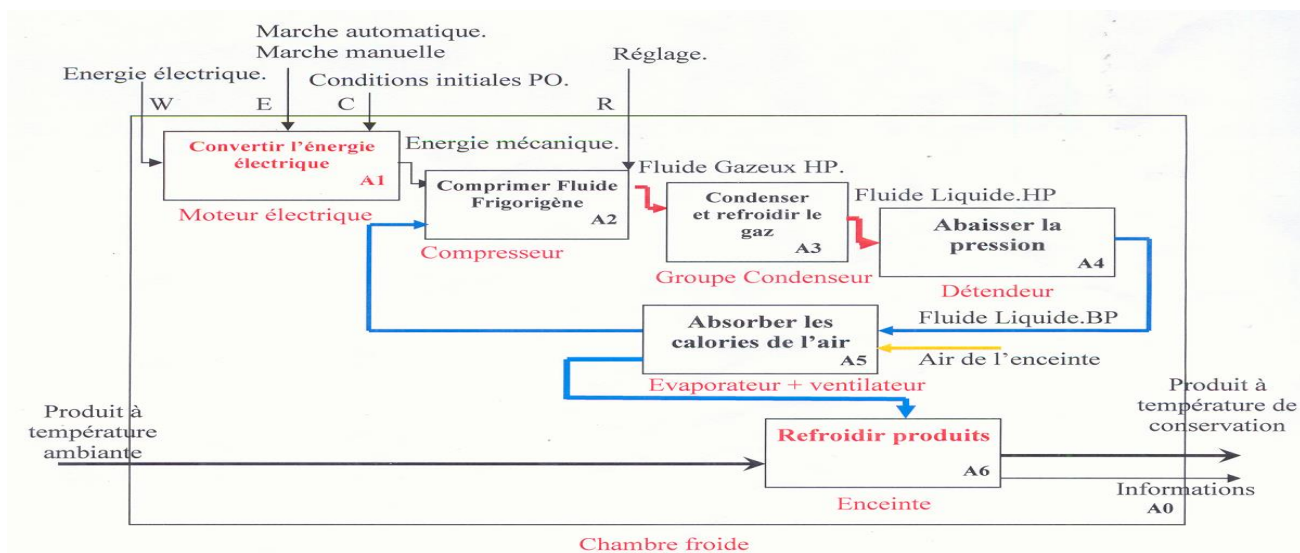
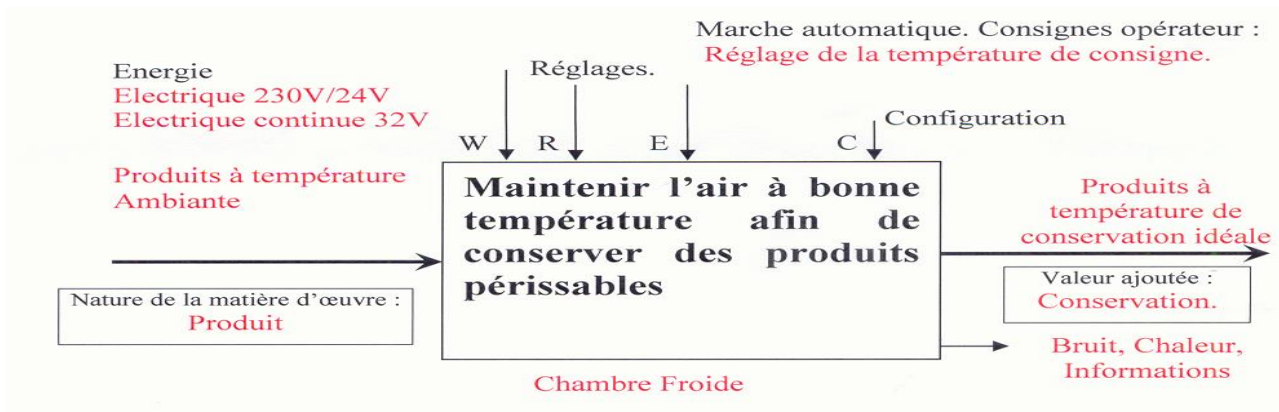


Figure II.3 : machine frigorifique-principe [51]



La chambre froide, chambre réfrigérée une machine thermodynamique constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide de travail (fluide frigorigène). Ce circuit est composé de quatre éléments principaux : **un compresseur, un détendeur et deux échangeurs de chaleur (le condenseur et l'évaporateur)**. Le but de cette machine thermodynamique il permet d'abaisser la température d'un milieu relativement froid (la source froide) et simultanément d'augmenter la température d'un autre milieu relativement chaud (la source chaude) au moyen d'une dépense d'énergie mécanique. [22]

### II.4. Les composantes d'une chambre froide

Les composants de base, sont le compresseur, le condenseur, le détendeur et l'évaporateur. À ceux-ci, il est primordial d'intégrer les liaisons frigorifiques ainsi que le fluide frigorigène.

Le fluide frigorigène décrit un cycle fermé en quatre phases à travers le circuit constitué des organes principaux :

- La compression du fluide gazeux
- La condensation du fluide gazeux
- La détente du fluide liquide
- La vaporisation du fluide liquide (production du froid)

### II.4.1. Compresseur

Le compresseur frigorifique est indispensable. Sans lui, le fonctionnement de la chambre froide est impossible. Un dispositif électrique et organe mécanique essentiel pour l'installation frigorifique qui sert à comprimer le gaz (fluide frigorigène).

La vapeur de réfrigérant circule dans le compresseur toujours dans le même sens :

Elle entre sous basse pression par la conduite d'aspiration puis elle est refoulée à une pression plus élevée. L'astuce consiste à comprimer le gaz jusqu'à ce que sa température devienne plus élevée que celle du milieu extérieur.

Le compresseur amène le gaz frigorigène en provenance de l'évaporateur à une pression suffisante pour qu'il puisse se liquéfier.

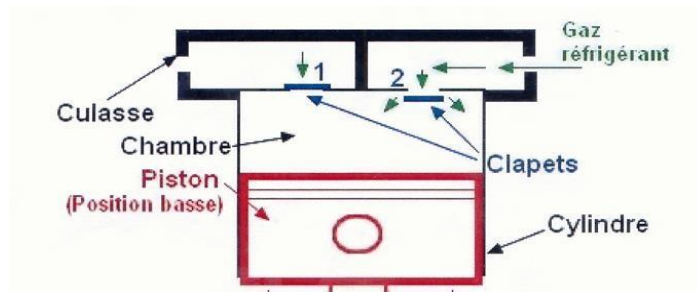
Le compresseur est l'organe mécanique le plus compliqué et le plus délicat des installations et ce sera lui qui fera l'objet des vérifications les plus fréquentes et les plus systématiques lors d'une inspection de l'installation [23].



Figure II.4 : Compresseur [52]

**Aspiration du gaz**

Le système d'aspiration se produit grâce au piston qui produit une dépression

**Schéma: Etape 1 : l'aspiration****Refoulement du compresseur**

Le gaz est ensuite compressé par des pistons dans la chambre où l'orifice de sortie est petit, ce qui permet une montée en pression du gaz qui est dirigée vers la sortie du compresseur, toujours en état vapeur avec une température de 70°C

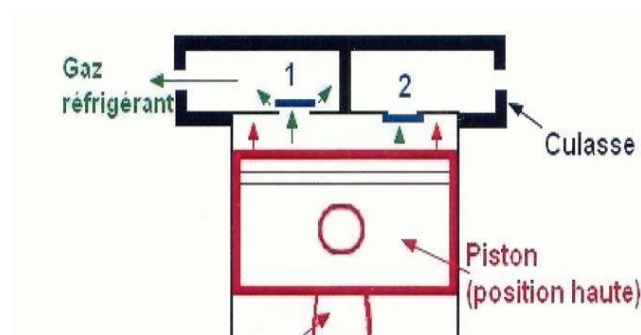
**Etape 2 : le refoulement**

Schéma du compresseur (Aspiration et Refoulement)

- **Rôle du compresseur :**

- D'aspirer les vapeurs produites par la vaporisation du fluide frigorigène dans l'évaporateur à une pression faible.
- Comprimer l'air froid (fluide frigorigène) afin de permettre leur condensation par refroidissement.
- Il permet également au fluide frigorigène de circuler dans l'installation frigorifique.

- **Différents types de compresseurs :**

Il existe plusieurs types de compresseur, du petit compresseur domestique comme sur un réfrigérateur de type hermétique, au plus gros modèle pour les applications industrielles [23].

- **Les compresseurs volumétriques :**

Dans lesquels la compression des vapeurs est obtenue par la réduction du volume intérieur d'une chambre de compression, c'est le type de compresseur le plus répandu sur les installations frigorifiques.

Toutes les machines qui au moyen de mouvements dans un cylindre aspirent la Vapeur, la compriment et l'envoient dans la tête de cylindre appartiennent à la Catégorie des compresseurs volumétriques

- **Les compresseurs centrifuges :**

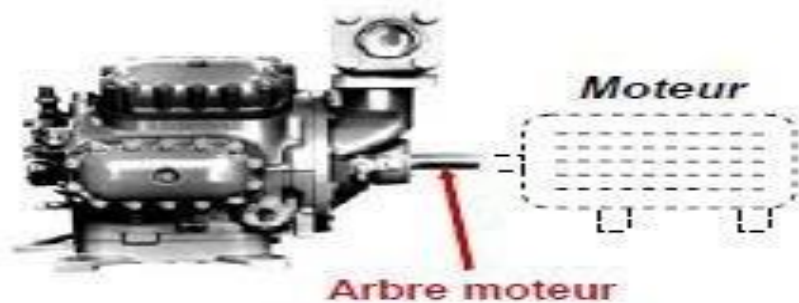
Aussi appelés turbocompresseurs dans lesquels la compression résulte de la force centrifuge obtenue par entraînement dynamique au moyen d'une roue à aubes, c'est un type de compresseurs destiné à des applications spécifiques et utilisés pour de grandes puissances (groupes frigorifiques de en génie climatique par exemple).

On les distingue également par l'association grande puissance moteur-compresseur :



**✚ Le compresseur ouvert :**

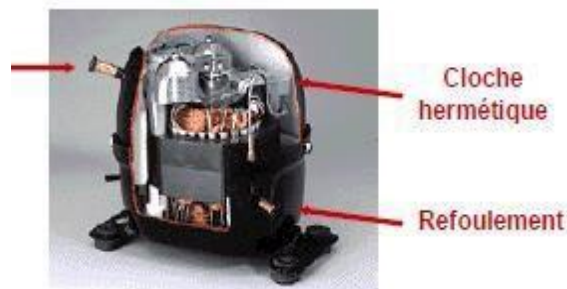
Le moteur est séparé du compresseur : (voir figure) [24]



**Figure II.5 :** compresseur ouvert [53]

**✚ Le compresseur hermétique :**

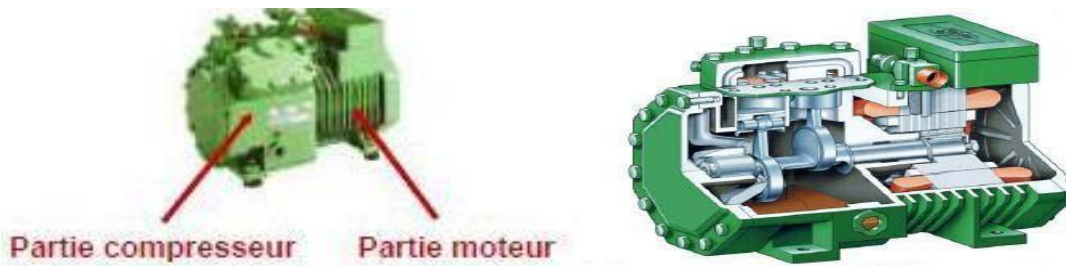
Le moteur est indissociable du compresseur et l'ensemble est enfermé dans une cloche hermétique (voir figure) [24]



**Figure II.6 :** compresseur hermétique [53]

**✚ Le compresseur semi-hermétique :**

Le moteur est indissociable du compresseur, mais l'ensemble peut être ouvert (voir figure) [24]



**Figure II.7:** compresseur semi –hermétique [53]

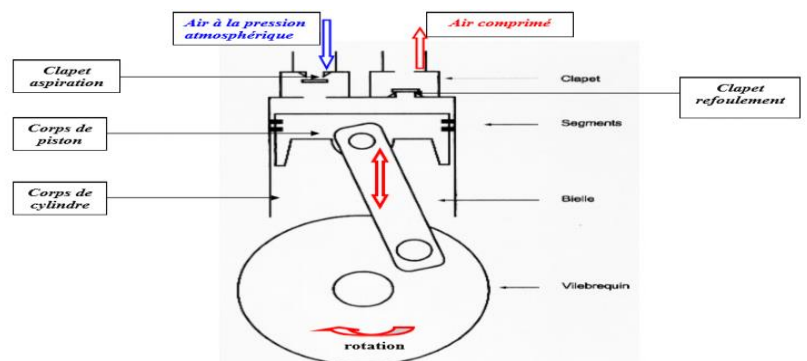
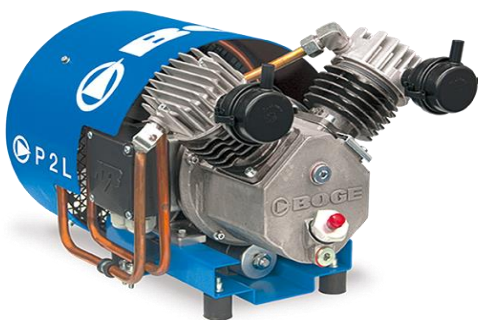
➤ **Les compresseurs mécaniques :**

Les compresseurs mécaniques sont de types très variés, leur évolution n'a pas cessé depuis la naissance de l'industrie frigorifique, et ils évoluent encore, de même que leur conception et leur réalisation.

✚ **Compresseurs à piston :**

La compression s'effectue par un mouvement alternatif d'un piston dans une chambre (cylindre) (voir figure). [25]

- Les plus répandus pour les petites puissances.
- Supportent mal la variation de fréquence.
- Modèles optimisés à culasses coniques.

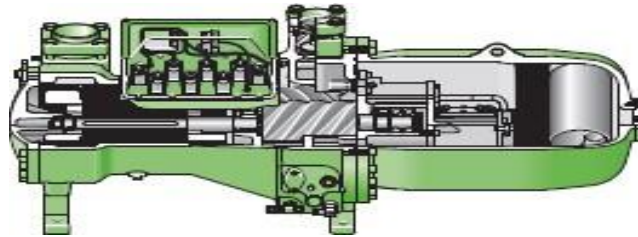


**Figure II.8 :** compresseur à piston [54]

✚ **Compresseurs à vis :**

Le gaz est comprimé par réduction progressif du volume dans une vis d'Archimède (Voir figure). [25]

- Pour les puissances importantes
- Peu d'application en froid commercial



**Figure II.9** : compresseur à vis [54]

➤ **Compresseurs scroll** (à spirale) :

Le gaz suit un parcours en forme de spirale et est comprimé par réduction (voir figure) [25]

- Utilisés en froid commercial pour des puissances assez faibles
- Adaptés pour la variation de fréquence
- COP un peu moins bon que les pistons
- Tolèrent la présence de liquide dans le gaz



**Figure II.10** : compresseur scroll [54]

| Type de Machine                               | Conception et construction |                            | Mode de compression      |                              |
|---|----------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Compresseurs mécaniques alternatifs à pistons | À simple ou double effet   | Ouverts                    | Verticaux                | compression simple ou étagée |
|   |                            | À simple effet             |                          |                              |
|   | Hermétiques                |                            |                          |                              |
| Compresseurs mécaniques rotatifs              | rotatifs à piston roulant  | Ouverts                    | verticaux ou horizontaux | compression simple           |
|   |                            | rotatifs à piston tournant |                          |                              |
|   | hermétiques                |                            |                          |                              |
| Compresseurs mécaniques à vis                 | à vis                      | Ouverts                    | verticaux ou horizontaux | compression simple ou étagée |
|   |                            | hermétiques accessible     |                          |                              |
|   |                            | hermétiques                |                          |                              |
| Compresseurs mécaniques à spirales            | à spirales                 | Ouverts                    | verticaux ou horizontaux | compression simple           |
|   |                            | hermétiques                |                          |                              |
|   |                            | Accessible                 |                          |                              |
|   |                            | Hermétiques                |                          |                              |

**II.4.2. Condenseur**

- **Généralités :**

Le condenseur est un élément clef dans le fonctionnement de la chambre froide. Les condenseurs sont des échangeurs thermiques (échangeurs de chaleur) entre le fluide frigorigène et un fluide de refroidissement [26].

Le condenseur est un échangeur de chaleur qui va permettre l'évacuation de la

chaleur contenue dans le fluide frigorigène gazeux issu du compresseur en le liquéfiant. Cette condensation (liquéfaction) est obtenue par le refroidissement du fluide frigorigène gazeux à pression constante par un médium qui peut être de l'eau ou de l'air.

Cette évacuation de chaleur s'effectue en trois étapes :

- la désurchauffe des vapeurs de fluide frigorigène (évacuation par chaleur sensible)
- la condensation des vapeurs (évacuation par chaleur latente étape principale)
- Le sous refroidissement du fluide frigorigène liquide (évacuation par chaleur sensible)



**Figure II.11 : Condenseur [52]**

- **Rôle du Condenseur :**

Son rôle est :

- D'évacuer la chaleur du circuit.
- Ils servent de liquéfier (ou condenser, transformation d'un gaz en liquide) de la vapeur sur une surface froide.

- **Différents types de Condenseur :**

On distingue deux familles de condenseurs suivant le fluide de refroidissement : [26]

- **Les condenseurs à air :**

- Les condenseurs à air à convection naturelle

➤ Les condenseurs à air à convection forcée

• **Les condenseurs à eau :**

- Les condenseurs à double tube (condenseurs coaxiaux)
- Les condenseurs bouteilles (condenseurs à serpentins)
- Les condenseurs multitubulaires
- Les condenseurs à plaques brasées (échangeur à plaques)

| Condenseurs                                     |                                  |   |                         |
|---|----------------------------------|---|-------------------------|
| à chaleur sensible                              |                                  | à chaleur latente                             |                         |
| A eau   | A air                            | Atmosphériques                                | A évaporation<br>Forcée |
| A immersion                                     | A circulation d'air<br>naturelle | A calandres<br>(multitubulaires<br>verticaux) | évapo - condenseur      |
| A double tube et<br>contre-courant              | A circulation d'air<br>forcée    | A ruissellement<br>simple                     |                         |
| A calandres<br>(multitubulaires<br>horizontaux) |                                  | A ruissellement<br>Courant                    |                         |

**Tableau II.2 : Classement des condenseurs**

Le tableau suivant donne les avantages et les inconvénients de chacune des deux familles.

|                          | Avantage   | Inconvénient  |
|--------------------------|--|---|
| <b>Condenseurs à air</b> | Air disponible en quantité illimitée<br>Entretien simple et réduit   | Coefficients globaux d'échange thermique relativement faibles<br><br>Plus imposants et plus lourds<br><br>Températures de condensation élevées dans les pays chauds |
| <b>Condenseurs à eau</b> | Coefficients globaux d'échange thermique plus élevés<br><br>Plus compacts et moins encombrants à puissance égale<br><br>Températures de condensation stables et de bas niveau<br><br>Fonctionnement moins bruyant<br><br>Possibilité de récupération d'énergie | Gaspillage d'eau pour les condenseurs à eau perdus<br><br>Nécessité de mise en place d'un système de refroidissement de l'eau                                       |

**Tableau II.3 :** Avantages et inconvénients des condenseurs à air et à eau.

### II.4.3. L'Évaporateur

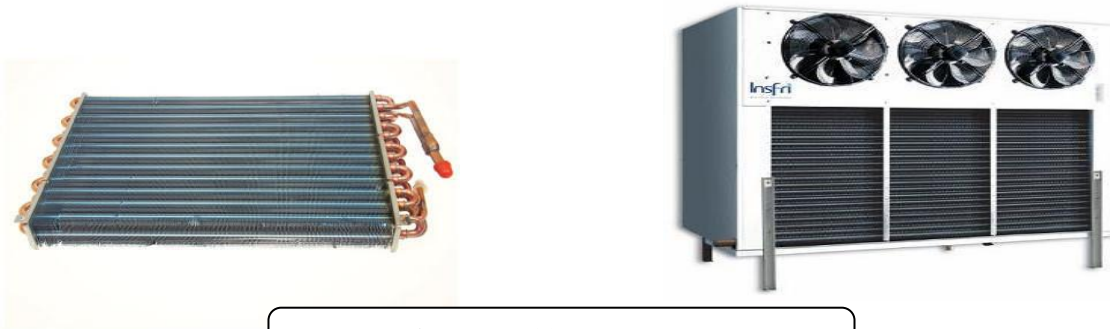
- **Généralités :**

Un évaporateur est un appareillage réalisant dans une de ses parties un changement d'état de liquide au gazeux. En génie chimique, l'évaporateur est un appareil dessiné pour concentrer une solution par apport d'énergie. L'évaporateur est un échangeur de chaleur dans lequel le

fluide frigorigène liquide à bas niveau de température et de pression va absorber la chaleur du milieu à refroidir (air ou eau) à pression constante devenant ainsi gazeux.

Cette absorption de chaleur s'effectue en deux étapes :

- l'évaporation du fluide frigorigène liquide (aspiration de chaleur latente – étape principale)
- la surchauffe des vapeurs issues de l'évaporation du fluide frigorigène liquide (aspiration de chaleur sensible) [27].

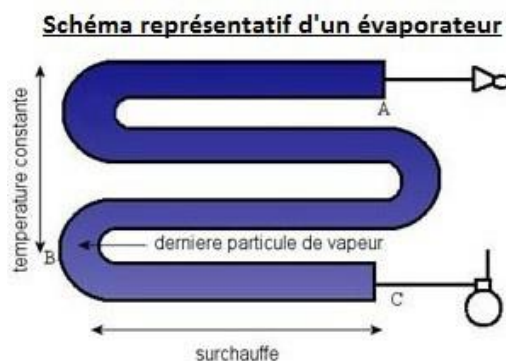


**Figure II.12 : Evaporateur [55]**

• **Rôle de l'Evaporateur :**

L'évaporateur est lui aussi primordial puisque son rôle est :

- Capturer la chaleur du local à refroidir.
- permet de décompresser le fluide frigorigène. Au cours du passage dans l'évaporateur, le fluide frigorigène passe de l'état liquide à l'état gazeux, c'est le phénomène d'évaporation qui produit ainsi du froid.





- **Différents types d'Evaporateur :**

On distingue deux familles d'évaporateurs suivant le fluide à refroidir : [27]

- **Les évaporateurs à eau :**
  - L'évaporateur double tube (évaporateurs coaxiaux)
  - Les évaporateurs du type serpentin
  - Les évaporateurs multitubulaires
  - Les évaporateurs du type échangeur à plaques
  
- **Les évaporateurs à air :**
  - Les évaporateurs à air à convection naturelle
  - Les évaporateurs à air à convection forcée

Suivant le mode de fonctionnement de l'évaporateur, on distingue :

- Les évaporateurs à détente sèche ou à surchauffe
- Les évaporateurs noyés ou évaporateurs à regorgement

| <i>Evaporateurs</i>                          |                  |
|--|------------------|
| <i>TYPES</i>                                 | <i>K W/m². K</i> |
| <b>Refroidisseur de liquide</b>              |                  |
| A serpentin                                  | 70 à 95          |
| A immersion                                  | 230 à 290        |
| A grilles                                    | 400 à 470        |
| Intensifs                                    | 580              |
| A ruissellement                              | 930 à 1400       |
| <b>Refroidisseur de gaz</b>                  |                  |
| Circulation d'air naturelle / tubes ailettes | 7 à 9            |
| plaques eutectiques                          | 6 à 8            |
|  | 16 à 24          |
| Circulation d'air forcée / tubes ailettes    |                  |

**Tableau II.4 :** Classification des évaporateurs et les coefficients globaux

#### II.4.4. Détendeur

- **Généralités :**

Un détendeur est un mécanisme utilisé pour faire passer un gaz stocké dans

Un étage (bonbonne de gaz, bouteille de plongée, réserve à oxygène, accumulateur, etc.) à une certaine pression, vers un étage de pression inférieure. Il chute la

pression de fluide frigorigène permettant ainsi que le fluide dans l'évaporateur absorbe l'énergie contenue dans l'aire d'un local [28].

C'est un dispositif de détente de la haute pression en basse pression généralement par laminage, au travers duquel le fluide frigorigène s'écoule vers l'évaporateur.



Figure II.13 : Détendeur [56]

- **Rôle du Détendeur:**

Le rôle du détendeur est :

- Modifier les conditions d'équilibre du fluide frigorigène liquide sortant du condenseur en abaissant la température du fluide.

- **Différents types de Détendeur :**

On a trois types de détendeur : [28]

- **Les tubes capillaires ou détendeurs capillaires.**
- **Les détendeurs thermostatiques.**
  - ✚ Les détendeurs thermostatiques à égalisation de pression interne.
  - ✚ Les détendeurs thermostatiques à égalisation de pression externe.
  - ✚ Les détendeurs thermostatiques MOP.
- **Les détendeurs électroniques.**

### II.4.5. Le réservoir de liquide

- Généralités :

Le réservoir ou bouteille liquide reçoit le liquide venant du condenseur, il est muni d'une vanne avec un tube plongeur qui assure l'alimentation en fluide même en cas de niveau bas de liquide, il existe en version horizontale ou verticale. [29]

Il est placé à la sortie du condenseur et sert à stocker le FF liquide à la mise en d'arrêt de l'appareil ou lors des opérations de maintenance.



**Figure II.14 : Réservoir liquide [57]**

Ce réservoir doit donc pouvoir contenir la totalité du fluide frigorigène nécessaire au bon fonctionnement de l'installation.

- Rôle de réservoir de liquide :

- Assurer la compensation des variations de volume du fluide du circuit.
- Permettant d'alimenter le détendeur en fluide frigorigène de façon correcte.
- Permettre la compensation des séquences d'ouverture et de fermeture du détendeur qui remplit ou vide l'évaporateur de fluide frigorigène
- Il permet aussi de stocker en cas d'intervention la totalité du fluide de l'installation, c'est pour cela qu'il est toujours équipé d'une vanne de départ liquide.

### II.4.6. La bouteille anti-coups de liquide

- **Généralités :**

Elle est placée entre l'évaporateur et le compresseur (à proximité du compresseur) et son rôle est d'éviter l'aspiration éventuelle de fluide frigorigélique liquide par le compresseur : prévention des coups de liquide.

Elle est également appelée bouteille d'aspiration, bouteille de surchauffe ou séparateur de liquide. Le principe de fonctionnement est basé sur la séparation des phases vapeur et liquide du fluide frigorigélique.

- **Caractéristiques :**

On utilise les compresseurs pour comprimer les vapeurs et non les liquides. Beaucoup de systèmes, surtout à température basse, sont sujets à un retour excessif de liquide de réfrigération qui dilue l'huile, lave les paliers et quelquefois provoque une migration totale de l'huile ou du carter du compresseur. Tout cela cause la rupture des soupapes, des pistons et du vilebrequin. La bouteille anti-coup de liquide fait fonction de réservoir auxiliaire et reçoit l'excès de mélange réfrigérant liquide- huile.



**Figure II.15** : La bouteille anti-coups de liquide [58]

- **Rôle La bouteille anti-coups de liquide :**

Le rôle de la bouteille anti-coup de liquide est de protéger le compresseur d'une éventuelle migration de liquide par la conduite d'aspiration qui causerait des dégâts irréversibles. La bouteille devra aussi assurer la révaporisation du liquide piégé.

Cet organe est très utile dans les pompes à chaleur au moment de l'inversion de cycle (dégivrage) le compresseur aspire brusquement du liquide, de ce fait le risque de coup de liquide est important, elle est aussi largement utilisée dans les installations à faible surchauffe. [31]

### II.5.7. Voyant liquide

- Rôle de Voyant liquide : [32]

#### Il permet de contrôler :

- L'état du fluide frigorigène dans la conduite liquide de l'installation
- La présence d'humidité dans le circuit frigorifique
- L'écoulement régulier de l'huile au carter, si le voyant est installé sur le retour d'huile qui relie le séparateur d'huile au compresseur.

- **Types de Voyant liquide :**

- **Voyant liquide à indicateur d'humidité :** à braser, raccord (mâle/femelle)
- **Voyant liquide simple :** à braser, raccord flaire mâle/mâle

- **Construction :**

Il est en laiton matricé à chaud, le témoin en verre est soit fondu directement dans le corps du voyant soit comprimé entre une bague métallique et le corps du voyant dont l'étanchéité est garantie par un joint.

- **Fonctionnement :**

Le voyant liquide est constitué d'un élément sensible (sel chimique) qui change de couleur en fonction de la teneur en humidité du circuit. Quand celui-ci est de couleur verte le circuit est considéré comme sain, quand il vire au jaune il est probable que le déshydrateur soit saturé d'humidité et il doit être changé. La présence d'humidité ne doit pas être acceptée afin d'éviter la formation d'acides préjudiciables au bon fonctionnement de l'installation.

La présence de bulle à travers le voyant indique soit un manque de fluide (sous certaines conditions), une évaporation partielle du fluide (chute de pression), un faible sous-refroidissement [32]



**Figure II.16 :** Voyant liquide [59]

#### II.4.7. Déshydrateur

- **Généralités :**

Un déshydrateur est un dispositif ou une machine qui permet de déshydrater des aliments sans les cuire (dessiccation). [33]

- **Rôles :**

- Retirer l'humidité contenue dans le fluide frigorigène.
- Filtrer le fluide frigorigène.
- Le déshydrateur empêche ainsi la formation de glace au détendeur.

- Il emmagasine les acides nuisibles se produisant dans le circuit frigorifique empêchant ainsi toute corrosion.

- **Types de déshydrateur:**

Les différents types de déshydrateur utilisent les rayons du soleil, la chaleur d'un four ou le courant électrique. Pour une parfaite déshydratation, toutes ces techniques nécessitent une douce circulation de l'air environnant les aliments pour empêcher qu'ils se saturent en humidité.

- **Déshydrateur solaire.**
- **Déshydrateur électrique.**

- **Les procédés de déshydratation :**

Les procédés utilisés pour la déshydratation d'un circuit frigorifique peuvent être classés en deux groupes qui sont différents entre eux par leur processus d'action. [33]

- **Physiques**

Ce sont des procédés utilisés en atelier (étuvage pendant quelques heures à des températures de 120 à 150°C des pièces à déshydrater tout en les maintenant sous-vide : pompe à vide).

- **Chimiques**

D'un produit déshydratant pour retenir l'humidité dont le réfrigérant peut se charger en Ils consistent à placer dans le circuit frigorifique une cartouche chargée parcourant le circuit.



**Figure II.17 : Déshydrateur [60]**



### II.4.8. Vanne électromagnétique

- Rôle :

La vanne électromagnétique (VEM) ou vanne solénoïde permet d'interrompre l'écoulement du fluide frigorigifique, cette vanne a de multiples applications, mais elle est principalement utilisée sur la ligne liquide soit pour éviter la migration du liquide dans l'évaporateur à l'arrêt de l'installation

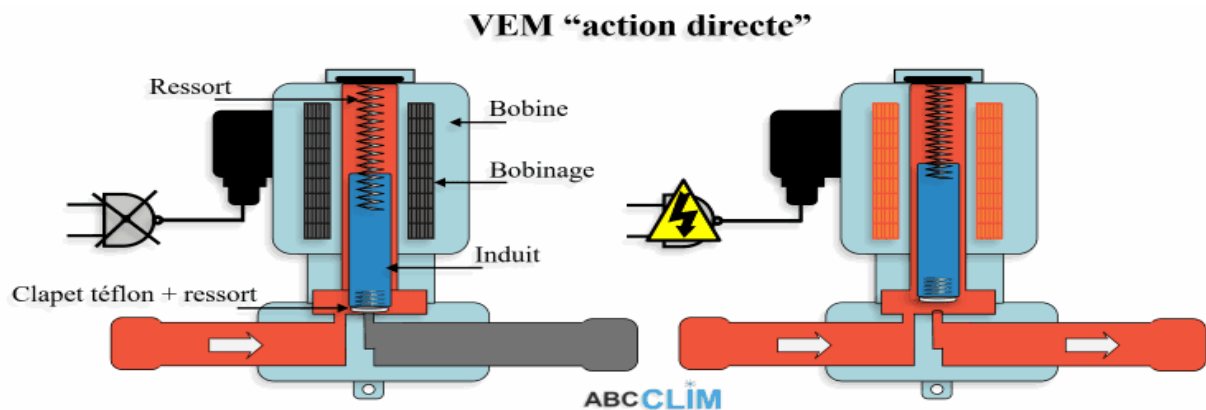
La vanne solénoïde commandée par thermostat stoppe l'alimentation du liquide, l'évaporateur se vide, la pression descend, le pressostat BP arrête le groupe. [34]



Figure II.18 : Vanne électromagnétique [61]

- Fonctionnement :

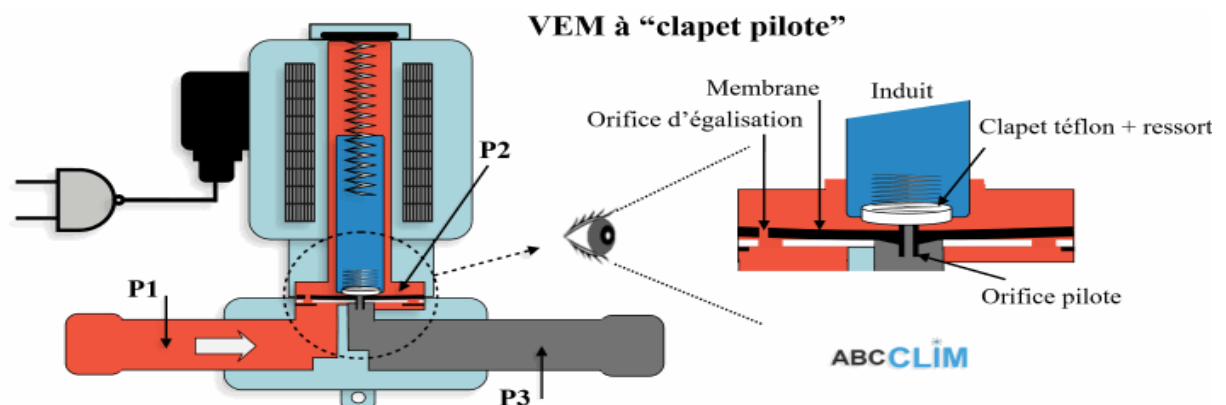
#### Solénoïde à action directe:



Au repos (non alimenté) un clapet téflon connecté à une masselotte en fer doux (induit) repose sur son siège, la pression présente dans la cheminée de l'induit conjuguée à l'action du ressort permet la fermeture de la vanne.

Lorsque la bobine est alimentée, l'induit est attiré par le champ magnétique créé, la force du champ magnétique étant plus importante que les forces combinées de la pression régnant dans la cheminée de l'induit et du ressort, le clapet se soulève et permet l'écoulement du fluide.

[34]



- **VEM à clapet pilote :**

Hors tension, le clapet obture l'orifice pilote. Un orifice d'égalisation situé sur la membrane permet à la pression au-dessus et au-dessous de la membrane d'être égale ( $P1 = P2$ ,  $P2 > P3$ ). Lorsque l'on alimente la bobine, le champ magnétique attire l'induit et l'orifice pilote s'ouvre. Le fluide situé au-dessus de la membrane (dans la cheminée P2) s'écoule naturellement par l'orifice pilote, la pression HP en amont (côté P1) est alors la plus forte et soulève la membrane libérant ainsi le passage principal ( $P1 > P2 > P3$ ).

Une fois la bobine désalimentée, le poids de l'induit poussé par son ressort ferme l'orifice pilote. La fermeture de l'orifice pilote provoque l'augmentation de pression amont au-dessus de la membrane et assure la fermeture. Pour fonctionner cette VEM a besoin d'une différence de pression amont, aval. [34]

Les vannes solénoïdes se montent sur la ligne liquide ou d'aspiration de l'évaporateur à réguler, mais le montage sur ligne liquide est plus courant.

#### II.4.9. Pressostats :

- Généralités :

Les pressostats sont des appareils utilisés essentiellement dans les installations frigorifiques et de conditionnement de l'air pour assurer une protection contre une pression d'aspiration trop faible ou une pression de refoulement trop élevée. Ils peuvent également être utilisés comme appareils de régulation de pression et de température de condensation des machines frigorifiques.

Ces appareils sont présents aussi dans les installations de conditionnement de l'air pour contrôler l'encrassement des filtres.

En cas général, Le principe de régulation des pressostats est celui de la boucle courte et fermée : Le paramètre mesuré sera contrôlé. C'est un appareil de régulation dit TOR (Tout Ou Rien) ou encore, Marche / Arrêt. [35]



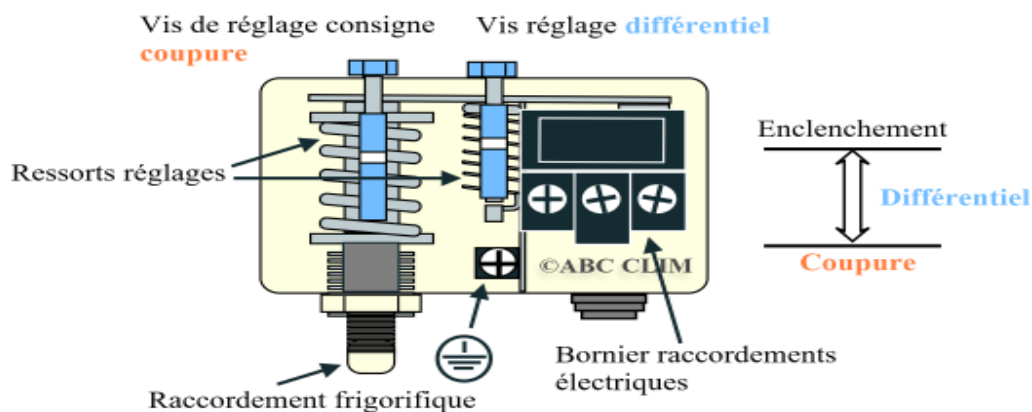
**Figure II.19:** Pressostat [62]

- **Types de pressostats:**
  - **Pressostat basse pression (BP)**

Le pressostat basse pression est un organe important du circuit frigorifique peut remplir à la fois le rôle de régulation de la pression d'évaporation ou de sécurité contre une pression très faible (inférieure à 0,1 bar).

Ce pressostat est installé généralement en amont du tube d'aspiration du compresseur. Il est utilisé principalement pour les chambres froides; les refroidisseurs de liquide;... etc.

C'est élément déterminant du fonctionnement en pump-down. Il assure la marche et arrêt du compresseur. [35]



**Figure II.20 : Pressostat BP [62]**

- **Fonctionnement**

Le pressostat BP détecte la chute ou la montée de la pression régnant dans l'évaporateur. L'évaporateur étant rempli d'un mélange liquide- vapeur de réfrigérant, il existe un lien direct entre la température du fluide et de la pression.

- **Pressostat haute pression (HP)**

Le pressostat haute pression est un organe de sécurité qui permet de protéger l'installation en cas de haute pression trop élevée souvent causée par un encrassement du condenseur ou un défaut du ventilateur condenseur, mais il est aussi employé pour réguler la pression et la température de condensation d'un condenseur à air.

La réglementation stipule qu'un pressostat HP de sécurité est obligatoire pour les installations à partir de 2,5 kg de fluide frigorigène, au-delà de 100 kg cette norme rend obligatoire l'utilisation d'un double pressostat HP. [35]

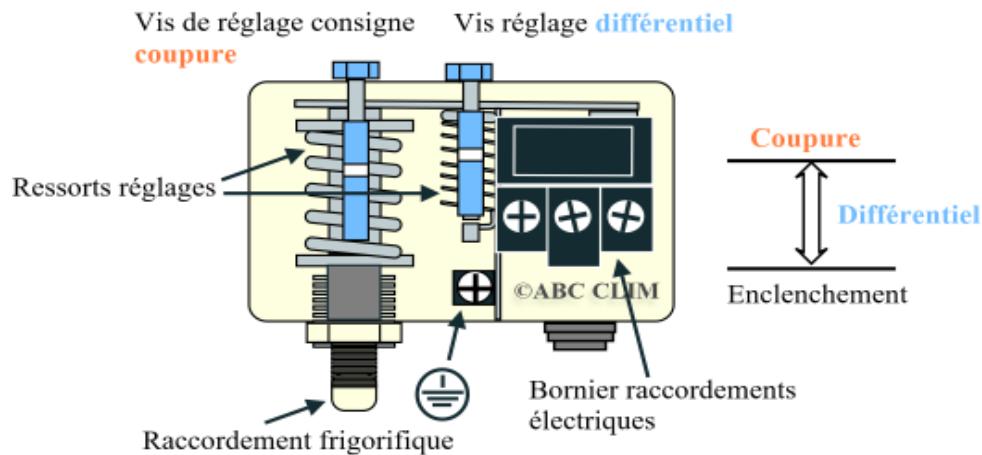


Figure II.21 : Pressostat HP [62]

➤ **Pressostat combiné BHP (Basse Haute Pression)**

Le pressostat combiné remplit les fonctions de pressostat **BP** et **HP** (deux en un). Soit en organe de commande sur le circuit basse pression et de sécurité sur le circuit haute pression. Soit en organe de sécurité en haute et basse pression. [35]



Figure II.22 : Pressostat combiné BHP [62]

### II.4.10. Le séparateur d'huile

- **Généralités :**

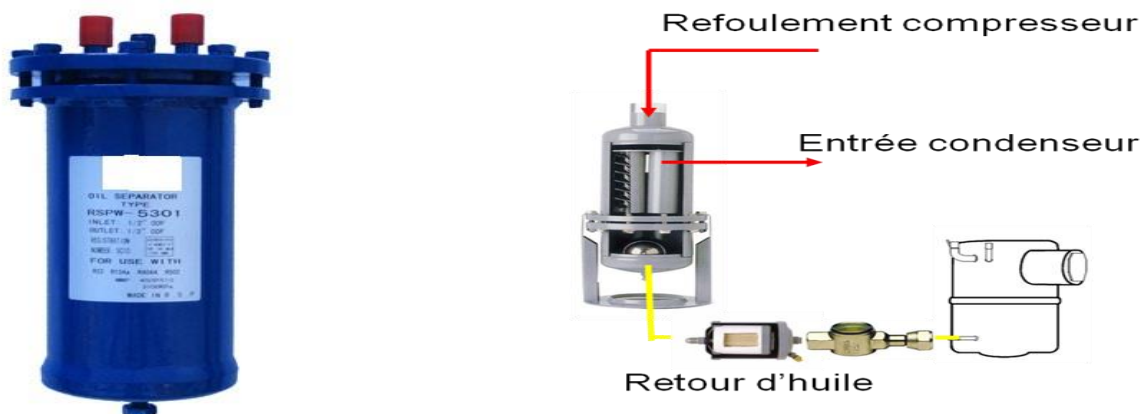
L'huile contenue dans le carter des compresseurs ne doit pas migrer en quantité trop importante dans le circuit frigorifique pour pouvoir assurer correctement son rôle de lubrification. Il est pourtant difficile d'empêcher pendant le fonctionnement qu'une certaine quantité d'huile s'échappe du carter en fines gouttelettes.

Cette migration d'huile est inévitable, chute de pression, démarrages répétés du compresseur, température d'évaporation basse, cependant celle-ci doit pouvoir circuler tout au long du circuit frigorifique et revenir dans le carter du compresseur, scénario tout à fait réalisable dans les petites installations mais plus aléatoire dans les installations les plus compliquées. Notons aussi que la présence excessive d'huile dans l'évaporateur et le condenseur est de nature à réduire les performances globales de l'installation, l'huile s'accumulant en fines couches autour des tubes agira comme un isolant empêchant les transferts thermiques.

Donc pour éviter tous les désagréments **on utilise séparateur d'huile** placé directement refoulement du compresseur. [36]

- **Rôle :**

Il a pour rôle comme son nom l'indique de séparer l'huile contenue dans les vapeurs sortant du compresseur et de la rediriger vers le carter via un dispositif à flotteur. [36]



**Figure II.23 : Le séparateur d'huile [63]**

### II.4.11. Thermostat

Le thermostat désigne un système qui permet de réguler ou de maintenir une température constante. [37]



Figure II.24 : Thermostat [64]

- **Principe du thermostat :**

Dans les faits, il mesure une résistance électrique qui fluctue avec les variations de température. Cette mesure électronique permet alors de réguler la température pour parvenir à celle choisie. Le thermostat interrompt l'arrivée de la chaleur lorsque celle-ci dépasse une limite donnée, et à l'inverse fait appel à une arrivée de chaleur lorsque celle-ci se trouve en dessous d'une autre limite. [37]

- **Les différents types de thermostats :**

Le thermostat peut être de deux types : passif, il permet de conserver une température donnée pendant un temps limité (c'est le cas par exemple des « Thermos ») ; actif, il permet de réguler la température pour la maintenir à une hauteur donnée. Aujourd'hui, le thermostat est majoritairement électronique. [37]

### II.4.12. Eliminateur de vibrations

Il permet de :

Réduction des vibrations mécaniques transmises par les compresseurs, aux tuyauteries de refoulement, de liquide, d'aspiration et de retour d'huile, indirectement des bruits qu'elles génèrent, et élimination des contraintes dues aux dilatations des tuyauteries d'installations de réfrigération et de conditionnement d'air.

Il se monte le plus près possible de l'organe qui produit ces vibrations (refoulement compresseur, aspiration compresseur...). Il est constitué d'un tuyau flexible ondulé réalisé en inox ou en cuivre et revêtu d'une tresse en fil d'acier galvanisé ou en cuivre [38]



Figure II.25 : Eliminateur de vibrations [65]



### II.4.13. L'armoire électrique de chambre froide

Dans cette armoire électrique, on peut voir :

- Un sectionneur porte fusible.
- Un disjoncteur uni + neutre 230VAC (disjoncteur phase neutre).
- Un régulateur (dont la sonde est placée à la reprise d'air de l'évaporateur et qui contrôle l'électrovanne liquide).
- Une minuterie (pour le dégivrage de l'évaporateur).
- 3 disjoncteurs moteurs magnétothermiques (ici des GV2).
- Un contacteur auxiliaire (KA) avec un bloc additif.
- 3 contacteurs moteurs (KM) dont 1 qui a un bloc additif.

Le câblage de cette armoire, au niveau contrôle commande est un **automatique pump down**.

[39]



Figure II.26 : L'armoire électrique [66]

### Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre **le fonctionnement d'une chambre froide et ces éléments fondamentaux** qui vont produire de la glace. . Nous avons aussi éclairé l'importance de chaque organe dans cette installation. Ainsi le rôle de ses différents éléments.

## Chapitre. III

# Etude des charges thermiques

### III.1. Introduction

Avant de commencer à procéder au dimensionnement des composants d'une installation frigorifique, il est nécessaire dans un premier temps :

- de connaître très exactement la température souhaitée.
- de préciser les modalités et contraintes de réalisation de l'installation.
- puis de définir un concept d'installation.

Alors, on doit procéder à la détermination des charges techniques de la chambre froide, ces charges thermiques correspondant à la production frigorifique nécessaire pour en assurer la compensation.

### III.2. Conditions déterminantes

- Température ambiante extérieur  $(T_e)=24^\circ\text{C}$ .
- Température intérieur de la chambre froide  $(t_i)=5^\circ\text{C}$ .
- Humidité relative  $P=75\%$ .
- Température d'introduction des denrées  $=15^\circ\text{C}$ .
- Temps de fonctionnement du compresseur, (ou de l'installation)  $=16\text{h/jour}$ .
- Dimensions intérieures de la chambre froide :
- Largeur  $= 4,2\text{m}$ .
- Profondeur  $= 12\text{m}$ .
- Hauteur  $= 4\text{m}$
- Surface totale intérieur,  $S = 230,4\text{m}^2$  calculé précisément par la méthode de :
- $S=2*[1*(L-h)*h+L*h]$ .
- Epaisseur d'isolant  $=12\text{cm}$ .
- Volume brut intérieur étant de  $201,6\text{m}^3$ .
- Chaleur massique du produit  $C_p=3,64\text{KJ/Kg}\cdot\text{K}$ . (à  $T_s=10^\circ\text{C}$ ).
- La quantité de chaleur pour  $m= 1\text{ Kg}$  et  $T_s=10^\circ\text{C}$  égale à  $36.400\text{KJ}$ .

Avant de commencer à procéder au dimensionnement des composants d'une installation frigorifique, encore est-il nécessaire d'un premier lieu connaître très exactement les données précédemment indiqué là-dessus, et aussi préciser les modalités et contraintes de réalisation de l'installation.

### III.3. Présentation d'une chambre froide

Notre chambre froide est conçue et élaborer dans le but d'y stocker les produits laitiers fabriqués dans l'usine.

Elle assure la conservation en mode « réfrigération » sous une température intérieure variant de 2°C à 5°C.

Cette chambre froide est construite en dur d'une manière purement traditionnelle, c'est-à-dire qu'elle comporte :

- Un sol en béton armé.
- Quatre (04) parois verticales en brique doublé, avec une isolation en polystyrène expansé 2\*6cm, flingot, grillage, nid d'abeille et mortier de ciment.
- Un plafond en hourdis (dalle) avec une isolation et un dressage au ciment.
- Porte isotherme 2200\* 1200mm en double parois de tôle fine en alliage de Zinc avec isolation injectée par mousse polyuréthane de densité  $D=45\text{Kg/m}^3$ .

Cette chambre est de 200m<sup>3</sup> d'environ, équipée d'un évaporateur plafonnier à basse température avec le détendeur incorporé. Cet évaporateur est alimenté par un compresseur situé à l'extérieur de la chambre froide.

Le tout est généré par un groupe électrique et en plus un condenseur à air.

- **Dimensions**

| Dimensions | Largeur (m) | Hauteur (m) | Profondeur (m) |
|------------|-------------|-------------|----------------|
| Valeurs    | 4,2         | 4           | 12             |

**Tableau III.1** : dimensions de la chambre froide

La température d'une chambre froide résulte de l'équilibre entre deux flux de chaleur ; Un apporté par l'installation frigorifique.

Le deuxième reçu de l'extérieur à travers les murs, le plafond, le plancher et les portes, ce flux de chaleur est appelé déperdition qui sont dues à deux causes distincts :

- les apports de froid dû au renouvellement de l'air local.
- Les flux de chaleur traversant les parois par transmission.

### **III.4. Bilan frigorifique d'une chambre froide**

Le calcul des charges thermiques d'une chambre froide a pour objet la détermination de la puissance frigorifique de l'équipement à mettre en œuvre pour la réfrigération de cette chambre.

#### **III.4.1. Les charges thermiques d'une chambre froide**

Se répartissent en deux catégories :

Les charges thermiques externes

Les charges thermiques internes

##### **a. Les charges thermiques externes**

Comprennent :

- Les charges dues aux apports de chaleur par transmission à travers l'enveloppe de la chambre froide (parois verticales, plancher bas et plancher haut)
- Les charges dues au renouvellement d'air
- Les charges dues à l'ouverture des portes

Les charges thermiques internes se divisent en deux catégories que sont les charges dépendantes des produits entreposés et les charges indépendantes des produits entreposés.

##### **b. Les charges thermiques internes**

Dépendantes des produits entreposés comprennent :

- Les charges dues aux produits entrants
- Les charges dues à la respiration des produits (fruits et légumes)
- Les charges dues à la fermentation des produits (fromages)

### c. Les charges thermiques internes

Indépendantes des produits entreposés comprennent :

- Les charges dues à l'éclairage
- Les charges dues au personnel
- Les charges dues aux chariots élévateurs et transpalettes
- Les charges dues à la présence éventuelle d'autres machines

Les charges dues à la chaleur dégagée par le moteur de chaque ventilateur d'évaporateur les charges dues au dégagement de chaleur des résistances électriques des évaporateurs lorsque ces résistances sont mises sous tension en période de dégivrage.

## III.5.Détermination charges thermique externes

### III.5.1.Charges thermique par transmission à travers les parois Q tr

On procédé à ce calcul paroi par paroi d'abord les quatre parois verticales puis le plancher haut (toiture) et enfin le plancher bas. Ces pertitions ont pour valeur :

$$R = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^n \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}} \text{ en [N/m}^2 \cdot \text{k]} \quad (\text{III.1})$$

- $h_i$  : Coefficient de convection intérieur en  $W / .K$
- $h_e$  : Coefficient de convection extérieur en  $W / .K$
- $e_n$  : Epaisseur de La paroi j (n parois composées en série) en m
- $\lambda_n$  : Conductivité thermique de La paroi j en  $W/m.K$

### Murs

Mur double paroi de brique creuse de 10cm avec un isolant en polystyrène expansé de 2\*6cm d'épaisseur et d'un enduit ciment de 2cm extérieur et intérieur. Avec :

- $\lambda_{\text{brique creuse}} (\lambda_B) = 0.4 \frac{w}{m.k}$
- $\lambda_{\text{polystyrène expansé}} (\lambda_{PL}) = 0.037 \frac{w}{m.k}$
- Enduit ciment ( $\lambda_{E x}$ ) = 1,15w/ m. k

$$R = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + 2 \cdot \frac{e_{EC}}{\lambda_{EC}} + 2 \frac{e_B}{\lambda_B} + \frac{e_{PL}}{\lambda_{PL}} + \frac{1}{h_e}} \text{ en } [N / m^2 \cdot k] \quad (\text{III.2})$$

$$Q_{tr1} = R_1 \cdot S_1 \cdot \Delta T$$

- $Q_{tr}$ : flux de chaleur en (Watt)
- $R$  : coefficient d'échange ( $N/m^2 \cdot K$ )
- $S$  : surface d'échange ( $m^2$ )
- $\Delta T$ : la différence de température ( $T_e - T_i$ )
- $T_e$  : température extérieure en ( $^{\circ}C$ )
- $T_i$  : température intérieure en ( $^{\circ}C$ )

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{h} &= 0.06 \left[ m^2 \cdot \frac{k}{w} \right] \\ \frac{1}{h} &= 0.06 \left[ m^2 \cdot \frac{k}{w} \right] \end{aligned} \right\}$$

A.N:

$$R_1 = \frac{1}{0.06 + 2 \times \frac{2 \cdot 10^{-2}}{1.15} + 2 \times \frac{10 \cdot 10^{-2}}{0.4} + \frac{12 \cdot 10^{-2}}{0.037} + 0.03}$$

$$R_1 = 0.258 w/m^2 \cdot k$$

$$S_1 = 2 \times [I \times h + I \times L + h \times l]$$

$$S_1 = 2 \times [4.2 \times 4 + 4.2 \times 12 + 4 \times 12]$$

$$S_1 = 230.4 m^2$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 24 - 5 = 19^{\circ}C$$

$$Q_{tr1} = 1129.420 W$$

**Sol (ou plancher)**

Deux couches de béton armé de 10cm d'épaisseur l'une, avec un isolant en polystyrène expansé 2 x 6cm d'épaisseur.

$$Q_{tr2} = R_2 \cdot S_2 \cdot \Delta T$$

$$Q_{tr1} = R_2 \cdot S_2 \cdot \Delta T$$



A.N:

$$R_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + 2 \times \frac{e_{EC}}{\lambda_{EC}} + 2 \times \frac{e_B}{\lambda_B} + \frac{e_{PL}}{\lambda_{PL}} + \frac{1}{h_e}} \quad (III. 3)$$

$$R_2 = \frac{1}{0.06 + 2 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-2}}{1.15} + 2 \cdot \frac{10 \cdot 10^{-2}}{0.4} + \frac{12 \cdot 10^{-2}}{0.037}}$$

$R_2 = 0.292 \text{ W / m}^2 \cdot \text{k}$

$S_2 = L \times I$

$S_2 = 12 \times 4.2$

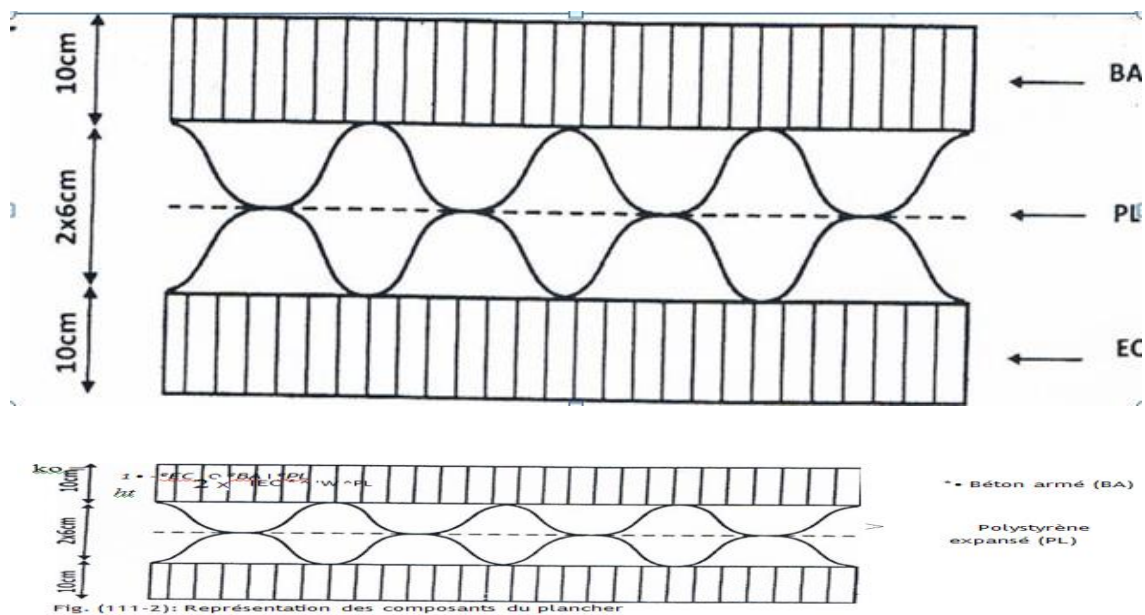
$S_2 = 50.4 \text{ m}^2$

$\Delta T = T_2 - T_1 = 24 - 5 = 19^\circ\text{C}$

$Q_{tr2} = 279.61 \text{ W}$

**Plafond :**

Dalle en béton armé d'épaisseur 20cm, un isolant en polystyrène expansé de 2 x 6cm et un dressage à l'intérieur de 2cm d'enduit ciment



**Figure III.1 : Représentation des composants du plafond**

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_{BA}}{\lambda_{BA}} + \frac{e_{PL}}{\lambda_{PL}} + \frac{e_{EC}}{\lambda_{EC}} + \frac{1}{h_e}} \quad (\text{III.4})$$

$$k_3 = 0,288 \text{ w/m.K}$$

$$S_3 = S_2 = 50,4 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = 19^\circ$$

$$Q_{tr3} = R_3 \cdot S_3 \cdot \Delta T$$

$$= 0,288 \times 50,4 \times 19$$

$$Q_{tr3} = 275,788 \text{ W}$$

### Porte

La porte a une hauteur de 2,10m, une largeur de 1,10m composée de 2 tôles en alliage de zinc de 1,5mm d'épaisseur enveloppant une isolant injectée par mousse polyuréthane de 6cm d'épaisseur et de densité égale à 45kg/m<sup>3</sup>.

Avec :

$$\lambda \text{ Pour de zinc } (\lambda_{TZ}) = 110 \text{ w/m.k}$$

$$\lambda \text{ Polyuréthane } (\lambda_{Pp}) = 0,029 \text{ w/m.k}$$

$$R_4 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + 2 \times \frac{e_{TZ}}{\lambda_{TZ}} + \frac{e_{PR}}{\lambda_{PR}} + \frac{1}{h_e}} \quad (\text{III.5})$$

$$R_4 = \frac{1}{0,06 + 2 \times \frac{0,15 * 10^{-2}}{110} + \frac{6 * 10^{-2}}{0,029} + 0,03}$$

$$R_4 = 0,288 \text{ w/m.K}$$

$$S_4 = 2,10 \times 1,10$$

$$\Delta T = 19^\circ$$

$$Q_{tr4} = R_4 \cdot S_4 \cdot \Delta T$$

$$= 0,463 \times 2.31 \times 19$$

$$Q_{tr4} = 20.328W$$

$$Q_{tr} = Q_{tr1} + Q_{tr2} + Q_{tr3} + Q_{tr4}$$

$$= 1129,420 + 279,61 + 275,788 + 20,328 /$$

$$Q_{tr} = 1705,146w$$

### III.5.2. Charges thermiques par renouvellement d'air $Q_{re}$

Il est prévu un renouvellement de l'air ambiant dans certaines chambres froides. Le renouvellement consiste au remplacement d'une partie de l'air de la chambre froide par de l'air extérieur.

Ce renouvellement a pour objectif:

- de conserver les denrées dans un bon état de fraîcheur
- éliminer les odeurs
- éviter une modification de la composition de l'air due à la respiration des produits et des personnes.

La quantité d'air neuf admise doit être refroidie de la température extérieure à la température de la chambre froide et constitue donc une charge thermique.

La charge thermique par renouvellement d'air a pour valeur :

$$Q_{re} = m_{ae} \cdot \Delta H \text{ en [KW]} \quad (III.6)$$

$Q_{re}$  : charge thermique par renouvellement d'air en W

$m_{ae}$  : débit massique de l'air extérieur admis en kg/s

$V_{ae}$  : débit volumique de l'air extérieur admis en  $m^3/kg$

$\rho_{ae}$  : masse volumique de l'air extérieur admis en  $kg/m^3$

$\Delta H$  : différence d'enthalpie entre l'air extérieur et l'air de la chambre froide en J/kg

$$\Delta H = H_e - H_i = 33,33 - 16,66$$

$$\Delta H = 16,66Kj/Kg$$

Le débit massique de l'air extérieur admis peut s'obtenir par la relation suivante :

$$m_{ae} = \frac{V_{ae} \cdot \rho_{ae}}{86400}$$

Avec :

$$\rho_{aa} = \frac{\rho_0}{1 + \frac{T}{273.15}}$$

Avec :  $\rho_0 = 1,293 \text{ Kg/m}^3$

$T = 5 \text{ k}$

$$\rho_{aa} = \frac{\rho_0}{1 + \frac{T}{273.15}}$$

$$\rho_{aa} = \frac{1.293}{1 + \frac{5}{273.15}}$$

$$\rho_{aa} = 1.269 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{ae} = V_{cf} \times n \quad \text{En } [\text{m}^3/\text{j}]$$

$$n = \frac{70}{\sqrt{V_{cf}}}$$

$$\text{ET } V_{cf} = I \times L \times H \quad V_{cf} = 4,2 \times 12 \times 4$$

$$V_{cf} = 201,6 \text{ m}^3$$

$$n = \frac{70}{\sqrt{201.6}}$$

$$n = 4,930 \text{ jour}^{-1}$$

$$V_{ae} = V_{cf} \cdot n = 201,6 \times 4,930$$

$$V_{ae} = 993,888 \text{ m}^3/\text{j}$$

$$m_{ae} = \frac{V_{ae} - P_{aa}}{86400}$$

$$m_{ae} = \frac{993.888 \times 1.269}{86400}$$

$$m_{ae} = 0,014 \text{ Kg/s}$$

$$Q_{re} = m_{ae} \times \Delta H$$

$$= 0,014 \times 16,66$$

$$Q_{re} = 0,233 \text{ KW}$$

$$Q_{re} = 233,24 \text{ W}$$

### III.5.3. Charges thermiques ouverture de porte $Q_{op}$

$$Q_{op} = [8,0 + (0,0067 \cdot \Delta T_p)] \times \tau_p \times \rho_{aa} \times l_p \times h_p \times \sqrt{h_p \left(1 - \frac{\rho_{ae}}{\rho_{aa}}\right)} \times (\Delta h) \times C_{ra} \quad (\text{III.7})$$

- $\Delta T_p = T_e - T_a$  (écart de température de l'air entre les deux cotés de la porte

( $T_a$  : la température ambiante de la chambre,  $T_e$  : température extérieure))

- $\tau_p$  : Temps d'ouverture de la porte min/h
- $\rho_{aa}$  : masse volumique de l'air extérieur admis en ( $\text{kg/m}^3$ )
- $l_p$  : largeur de la porte en(m)
- $h_p$  : hauteur de la porte en (m)
- $\rho_{ae}$  : masse volumique de du coté de la porte autre que la chambre froide en ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\Delta H$  : la différence entre enthalpie de l'air du coté de la porte et enthalpie de l'air ambiante dans la chambre froide d'un rideau d'air
- $C_{ra}$  : coefficient de minoration du à la présence éventuelle

$$\Delta T_p = 5 \text{ K}$$

$$\rho_{aa} = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$L_p = 1,2 \text{ m}$$

$$H_p = 2,0 \text{ m}$$

$$\rho_{aa} = \frac{1,293}{1 + \frac{5}{273,15}}$$

$$\Delta h = 16,66 \text{ kJ/kg}$$

$C_{ra} = 1$  par hypothèse car les portes ne sont pas équipées d'un rideau d'air froid

$$Q_{op} = [8,0 + (0,0067 \times 5)] \times 8 \times 1,269 \times 1,2 \times 2 \times \sqrt{2 \left(1 - \frac{1,269}{1,293}\right)} \times (16,66) \times 1 \quad (\text{III.7})$$

$$Q_{op} = 25897,31 \text{ W}$$

$$Q_{op} = 25,90 \text{ KW}$$

### III. 6. Calcul des charges thermiques internes

#### III. 6.1. Charges thermiques indépendantes des produits entreposés

Les luminaires des chambres froides classiques doivent pouvoir résister au froid, à l'humidité, être étanches à l'eau, être protégés des contacts avec tous objets (degré de protection IP 68) et être insensibles aux effets de la poussière.

L'éclairage nominal habituellement prévu oscille entre 60 et 100 lux ce qui fait que l'on peut adopter une charge thermique d'environ 6 W/m<sup>2</sup> au sol.

La charge thermique due à l'éclairage se calcule d'après la formule :

$$Q_{ec} = \frac{i \times p \times \tau}{24} \quad \text{En [W]} \quad (\text{III.8})$$

Avec :  $t' = 8h/j$  ;  $i = 4$  lampe

$$Q_{ec} = \frac{4 \times 60 \times 8}{24}$$

$$Q_{ec} = 80W$$

### III. 6.2. Charge thermique due aux personnes $Q_{pe}$

$$Q_{pe} = \frac{i \times p \times \tau}{24} \quad \text{En [W]} \quad (\text{III.8})$$

- $I$  : nombres de opérant dans la chambre froide
- $Q_f$  : quantité de chaleur dégagée par unité de temps par une personne en activité moyenne dans une chambre froide en W
- $\tau$  rinst : durée de chaque personne dans la chambre froide h/j
- Avec :  $i=8$  personnes  $t'' = 8h/j$

$$Q_{pe} = \frac{4 \times 240 \times 8}{24}$$

$$Q_{pe} = 320W$$

### III. 7. Charge thermique interne dépendante des denrées

#### III. 7.1. Puissance frigorifique intermédiaire d'évaporateur $Q_{int}$

Arrivé à ce stade calcul, il est nécessaire de déterminer la puissance frigorifique intermédiaire  $Q_{int}$  que l'évaporateur devront assurer afin de couvrir la charge thermique intermédiaire somme des différentes charges unitaires précédemment calculées. Cette puissance intermédiaire est la puissance frigorifique prévisionnelle  $Q_{prévu}$ .

$$Q_{de} = \frac{fi \times ci \times (T'_1 - T'_2)}{86400} \quad (\text{III.10})$$

- $f_i$ : Masse de denrées introduire chaque jour kg
- $c_i$  : Capacité thermique massique moyenne entre  $t_1$  et  $t_2$  de chaque type de denrée introduit en kJ/kg .k
- $T_1$  : Température initiale de la denrée introduit en °C
- $T_2$ : Température de congélation de la denrée introduit en °C

Avec :  $C_l = 3,85$  [KJ/Kg.K]

$T_2$  (congélation = 0°C)

$$Q_{de} = \frac{82,944 \times 3,85 \times (15-0)}{86400} \quad \text{En (KW)}$$

$$Q_{de} = 0,05544 \text{ KW}$$

$$Q_{de} = 55,44 \text{ W}$$

$$Q_{int} = Q_{tr} + Q_{re} + Q_{op} + Q_{ec} + Q_{pe} + Q_{de}$$

$$Q_{int} = 1705,46 + 233 + 25897,31 + 80 + 320 + 55,4$$

$$Q_{int} = 28291,2 \text{ KW}$$

$$Q_{int} = 28,29 \text{ KW}$$

$$Q_{pe} = \frac{Q_{int} \times 24}{t_{rinst}}$$

Avec :  $t_{rinst} = 16$ h/jour

$$Q_{pe} = \frac{28291,21 \times 24}{16} \quad \text{En (KW)}$$

$$Q_{int} = 42436,8 \text{ W}$$

$$Q_{int} = 42,43 \text{ KW}$$



### III.7.2 Charge thermique due aux moteurs des ventilateurs des évaporateurs

$Q_{vent}$

$$Q_{vent} = \frac{n \times p \times t_{evap}}{T_{rinst}} \quad \text{en (kw)} \quad (III.11)$$

- N : nombre de moteurs de ventilateurs
- P : puissance de ventilateur en W
- $\tau_{évapo}$  : durée de fonctionnement des ventilateurs en h/d
- $\tau_{rinst}$  : durée de marche de l'installation frigorifique en h/d

Avec :  $p = 360W$

$t_{mst} = t_{évapo}$

$T' = 1 \text{ moteur}$

### III. 7. 3 Charge thermique due résistantes de dégivrage $Q_{dég}$

$$Q_{dég} = \frac{n \times p \times t_{dég}}{T_{rinst}} \quad \text{en (KW)} \quad (III.12)$$

Avec :  $p'' = 3500w$  ;  $n=1$  résistance ce ;  $t_{dég} = 60\text{min/j}$

$$Q_{vent} = \frac{1 \times 3500 \times 1}{16} \quad \text{En (KW)}$$

$$Q_{dég} = 218.75W$$

Contrôle de puissance frigorifique effective de l'évaporateur

$$Q_{ef} = Q_{int} + Q_{vent} + Q_{dég}$$

$$Q_{ef} = 42436.81 + 360 + 218.75$$

$$Q_{ef} = 43015,56W$$

$$Q_{ef} = 43.01KW$$

### III.8. Sélection des composants d'installation frigorifique

#### a. Choix fluide frigorigène

Afin d'assurer une continuité de service pour les installations existantes, les producteurs de fluides frigorigènes ont élaboré des mélanges dits de transition à base de HCFC (R22, R124, R 142b, 152a) ayant une durée de vie d'environ une quinzaine d'années et des fluides définitifs (corps purs ou mélanges): R23, R32, R134a, R404...etc. Ces fluides permettent une conversion du fluide d'origine par un produit à faible (ou sans) action sur la couche d'ozone.

#### ➤ Réglementation Européenne

La réglementation communautaire en matière de CFC et HCFC stipule à ce jour pour les CFC :

- Arrêt de production de puis le 31/12/1994.
- Commercialisation et utilisation interdite à la date d'entrée en vigueur du texte (01/01/1999).
- Dérogation est donnée pour la maintenance jusqu'à 31/12/1999.

Pour les HCFC :

- Production autorisée jusqu'au 31/12/2014.
- Utilisation interdite dans les équipements neufs, depuis le 01/01/1996.
- Utilisation interdite dans les équipements neufs des entrepôts frigorifiques publics à partir du 01/01/2000
- Utilisation des HCFC interdite en maintenance à partir du 01/01/2008.

On a fait alors le choix du R 134a (HFC) comme fluide frigorigène pour notre installation.

#### b. Choix Température d'évaporateur

Lorsqu'on considère le ou les évaporateurs d'une installation frigorifique, on doit distinguer ceux fonctionnant en ventilation naturelle et ceux fonctionnant en ventilation forcée. Dans le premier cas, il n'est pas prévu de ventilateur mécanique alors que dans le second cas, il en est prévu un ou plusieurs.

Les évaporateurs à ventilation forcée sont actuellement les plus répandus puisqu'ils représentent plus de 80% du marché. Il s'agit dans la plupart des cas d'évaporateurs du type aspirant, c'est-à-dire d'appareils dont le ou les ventilateurs sont placés sur la face.

Tous les fabricants donnent dans leurs catalogues un certain nombre de recommandations concernant les plages d'utilisation de leurs différents modèles d'évaporateurs.

Dans mon cas pour cette chambre froide laitier, et en considération de toutes les données précédentes avec les puissances déjà calculé j'ai fait le choix d'un évaporateur dont l'écartement entre ailettes (pas) est de 4,5mm qu'est utilisé dans le cas des installations dont la température d'évaporation est supérieure ou égale à 0°C.

Le type d'évaporateur choisi est de modèle IK 7053C qui a les caractéristiques suivantes :

- Volume tube circuit : 67dm<sup>3</sup>.
- Dimension : L×l×h=2528\* 1356\*827.
- Projection d'air : 20m.
- Débit d'air: 12340 (m<sup>3</sup>/h).
- Nombre de ventilateur : 2×6250.
- $\dot{Q}=53,07$  KW.

### **c. Choix de groupe de condensation**

Dans la pratique, un condenseur à refroidissement à air est généralement déterminé sur la base d'une température de l'air de refroidissement tar de +32°C. Par ailleurs, les catalogues des fabricants donnent les caractéristiques de leurs condenseurs à refroidissement à air pour un écart normalisé de température AT=15K.

Le compresseur à utiliser sera de type mono-étage. Du document « COPLAND » pour les groupes semi-hermétiques on a sélectionné un groupe de type 400-DJ99-6W qui a les caractéristiques suivantes :

- Tube d'aspiration : 21/8"
- Tube refoulement : 13/8".
- Tube liquide : 7/8".

- Nombre de ventilateurs : 2.
- Débit d'air au condenseur : 6,41 (m<sup>3</sup>/s).
- Poids net/brut : 563/770 Kg.
- Nombre de ventilateurs : 2.
- Débit d'air au condenseur : 6,41 (m<sup>3</sup>/s).
- Poids net/brut : 563/770 Kg.

### III.9. Calcul de l'installation

$$T_s = T_o + \Delta T \text{ (avec } \Delta T \text{ de } 5 \text{ à } 7^\circ \text{ C)}$$

$$T_s = 5 + 6 = 11$$

$$T_s = 11^\circ \text{C}$$

#### a. Calcul de la température de la surchauffe

$$T_{sr} = T_e - \Delta T$$

$$T_{sr} = 42 - 4 = 38 \text{ (avec } \Delta T \text{ varie de } 5 \text{ à } 7^\circ \text{C)}$$

$$T_{sr} = 38^\circ \text{C}$$

#### b. Calcul du taux de compression

$$\tau = \frac{P_c}{P_0}$$

$$\tau = \frac{12}{3.5}$$

$\tau = 3,24 < 9$  ==> on a utilisé le système mono -

#### c. production frigorifique massique ( $Q_{fm}$ ) :

$$Q_{fm} = h_1' - h_4 = 418 - 251$$

$$Q_{fm} = 167 \text{Kj/m}^3$$

#### d. Production frigorifique volumique ( $Q_{fv}$ ) :

$$Q_{fv} = Q_{fm} / v'' \text{ avec } v'' = 0,06 \text{m}^3/\text{kg}$$

$$= 167 / 0,060$$

$$Q_{fv} = 2783,33 \text{Kj/m}^3$$

e. Travail théorique du compresseur par 1kg de fluide :

$$W_{Th} = h_2 - h_1 = 450 - 418$$

$$W_{Th} = 32 \text{ kJ/kg}$$

f. Débit massique du fluide frigorigène ( $q_m$ ) :

$$Q_m = Q_{réelle} / Q_{fm} = 43,01 / 167, q_m = 0,25 \text{ kg/s}$$

g. Volume horaire aspiré ( $V_{as}$ )

$$V_{as} = q_m \times v'' = 0,25 \times 0,060, V_{as} = 0,015 \text{ m}^3/\text{h}$$

h. rendement volumétrique ( $q_v$ )

$$q_v = 1 - 0,05 \times r = 1 - 0,05 \times 3,42, q_v = 0,83 = 86\%$$

i. Coefficient de performance idéal ( $f$ ) :

$$f = \frac{T_0}{T_C - T_0} = \frac{278}{315 - 278}$$

$$= 7.5$$

j. Coefficient de performance réel (COP) :

$$\text{COP} = \frac{Q_{fm}}{W_{th}}$$

$$\text{COP} = \frac{167}{32}, \text{COP} = 5.2$$

k. le rendement thermodynamique

$$\eta_{th} = \frac{\text{COP}}{f} = \frac{5,2}{7,5}$$

$$\eta_{th} = 0.693 = 0.70, \eta_{th} = 70\%$$

# Chapitre .IV

## Résultats et discussion

### IV.1. Introduction

Ce travail présente les performances de certains fluides réfrigérants dans la chambre froide négative et positive ainsi que leurs impacts sur l'environnement.

Les fluides réfrigérants étudiés sont : R-22, R-32, R-152a, R-410A

Pour cela un logiciel de commerce SOLKANE développé par l'entreprise allemande Solvay fluor GmbH Hanover a été utilisé.

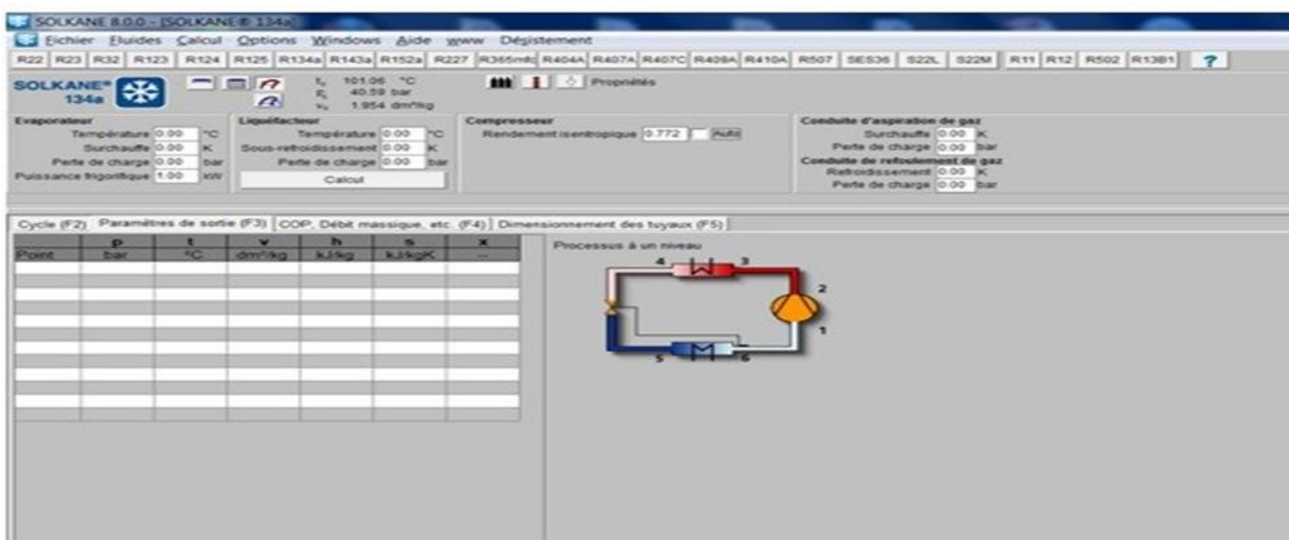
Les résultats ainsi obtenus sont présentés sous formes de tableaux et des diagrammes.

### IV.2. Présentation du logiciel SOL KANE 8

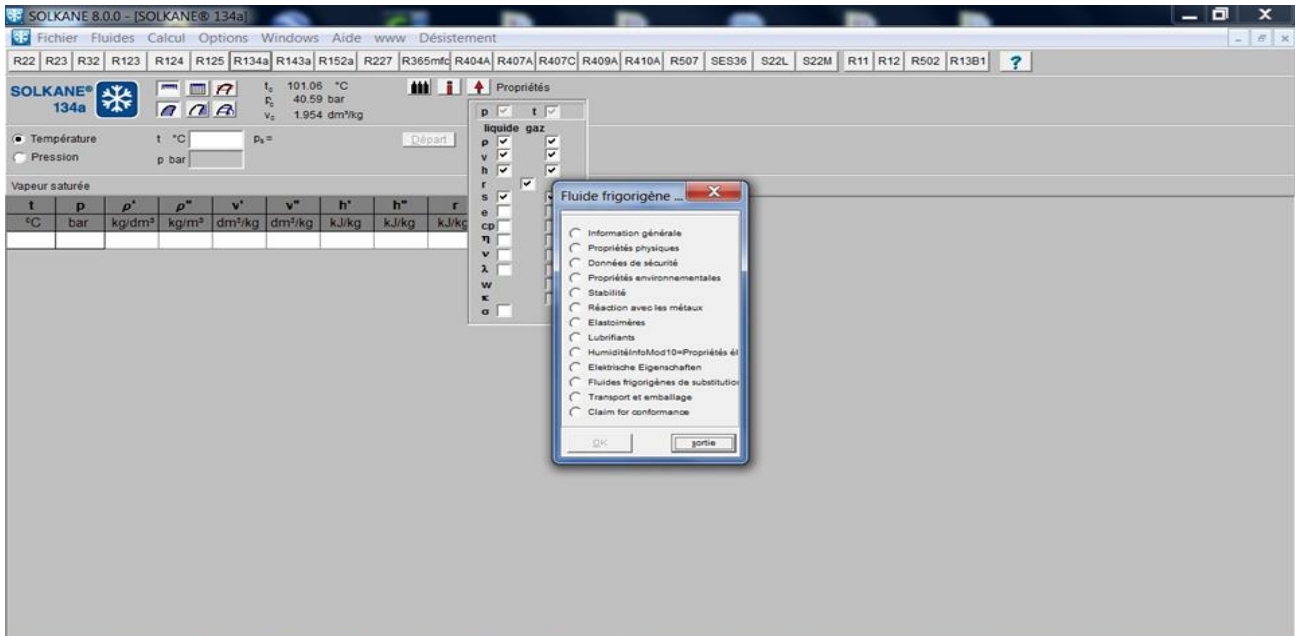
Le logiciel **SOL KANE 8** est utilisé pour :

- calculer les paramètres thermodynamiques des substances et les propriétés de transport de tous les fluides frigorigènes **SOLKANE8**.
- Afficher le diagramme P. H ou T .S des fluides frigorigènes **SOLKANE8**.
- Assurer dans une fenêtre d'aide de Windows, une information complète sur les fluides frigorigènes **SOLKANE 8** depuis les propriétés physiques jusqu'au transport et à la garniture.

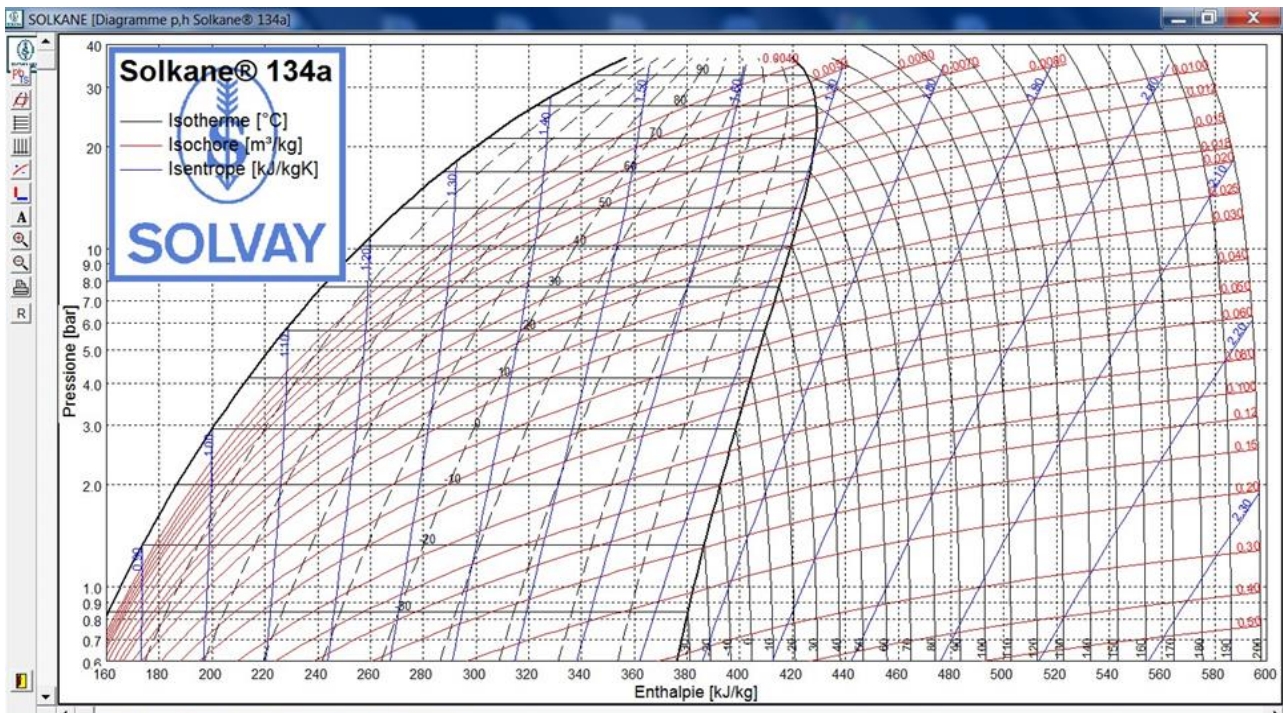
### Calcul des paramètres thermodynamiques de cycle de machine frigorifique un seul étage



Calcul de la propriété de fluide frigorigifique



Présentation du diagramme p. h





### IV.3. Etude d'impact des différents fluides réfrigérants

Pour cela, nous proposons d'évaluer l'effet de 4 fluides frigorigènes dans les mêmes conditions de fonctionnement sur une machine frigorifique ayant les caractéristiques suivantes :

#### a. Chambre froide négative

- Puissance frigorifique utile nécessaire :  $P_f = 200 \text{ kW}$
- Température de condensation =  $40 \text{ °C}$
- Température d'évaporation ou d'ébullition =  $-7 \text{ °C}$
- Surchauffe =  $12 \text{ K}$
- Sous-refroidissement =  $5 \text{ K}$
- Rendement du compresseur =  $0.8$

#### b. Chambre froide positive

- Puissance frigorifique utile nécessaire :  $P_f = 200 \text{ kW}$
- Température de condensation =  $50 \text{ °C}$
- Température d'évaporation ou d'ébullition =  $4 \text{ °C}$
- Surchauffe =  $20 \text{ K}$
- Sous-refroidissement =  $0 \text{ °C}$
- Rendement du compresseur =  $0.8$

### IV.4. La méthode du calcul

- Au niveau de l'évaporateur  $\Delta h \text{ évaporateur} = H_6 - H_1$
- énergie théorique de compression  $\Delta H \text{ compression} = H_2 - H_1$
- Au niveau de condenseur  $\Delta h \text{ condenseur} = H_2 - H_4$
- Le débit massique  $\text{Débit massique} = P_{fr} / h \text{ évaporateur} \text{ [kg/s]}$
- Le volume réel à aspirer par le compresseur  $\text{Volume réel} = \text{débit massique} \times \text{volume}$
- Le rendement volumétrique du compresseur  $\eta_{\text{Volume}} = 1 - (0,05 \times \tau)$  Où :  $\tau = HP / BP$
- La puissance électrique du compresseur  $P_{\text{Électre}} \text{ _ absorbée} = \text{débit massique} \times \Delta h \text{ compresseur}$
- Coefficient de performance  $\text{COP} = P_{\text{frigorifique}} / P_{\text{Électre}} \text{ _ absorbée}$

## IV.5. Le réfrigérant R-22

### a. Définition

Le R-22 est un fluide HCFC qui fut beaucoup utilisé dans des systèmes de chauffage-climatisation jusqu'au début des années 2000.

Après maintes études, ce fluide fut, de par sa constitution, mis en cause dans le phénomène d'appauvrissement de la couche d'ozone. La diminution de l'épaisseur de la couche d'ozone entraîne une augmentation des rayonnements ultraviolets nocifs pour la peau.

La Communauté Européenne décida, dans un premier temps, d'interdire la vente d'appareils utilisant ce fluide en 2004, d'en réduire ensuite l'utilisation sous la forme vierge depuis janvier 2010, puis d'en interdire la vente sous quelles que forme que ce soit le 1er janvier 2015.

### b. Principales applications

Le R-22 est un composé "hydro chlorofluorocarbone (HCFC)" à forte chaleur latente de vaporisation, largement utilisé en conditionnement d'air résidentiel, commercial et industriel. Il est aussi employé en basse température (jusqu'à - 40°C) pour la congélation et la surgélation.

### c. Huiles

Utiliser une huile minérale (MN) ou une huile alkyl benzène (AB) lors de basses températures d'évaporation. Vérifier auprès de Climalife la viscosité de l'huile retenue en fonction de l'application et la miscibilité avec le fluide considéré.

### d. Propriétés physiques

| Propriétés physiques  | Unités                 | R-22               |
|---|------------------------|--------------------|
| Masse molaire   | g/mol                  | 86,47              |
| Température de fusion   | °C                     | - 157,42           |
| Point d'ébullition (sous 1,013 bar)   | °C                     | - 40,81            |
| Glissement de température sous 1,013 bar  | K                      | 0                  |
| Tension de vapeur à<br>25°C<br>50°C   | bar                    | 10,44<br>19,43     |
| Température critique  | °C                     | 96,15              |
| Pression critique   | bar absolute           | 49,9               |
| Densité critique  | kg/m <sup>3</sup>      | 523,8              |
| Chaleur latente de vaporisation au point d'ébullition                               | kJ/kg                  | 233,7              |
| Conductivité thermique à 25°C<br>Liquide<br>vapeur sous 1,013 bar                   | W/(m.K)                | 0,08365<br>0,01058 |
| Tension de surface à 25°C   | 10 <sup>-3</sup> N/m   | 8,08               |
| Solubilité à 25°C<br>du fluide dans l'eau sous 1,013 bar<br>de l'eau dans le fluide | % poids<br>% poids     | 0,3<br>0,13        |
| Viscosité du liquide à 25°C   | 10 <sup>-3</sup> Pas   | 0,1658             |
| Chaleur massique à 25°C<br>Liquide<br>vapeur sous 1,013 bar                         | kJ/(Kg.K)<br>kJ/(Kg.K) | 1,257<br>0,662     |

|  |           |                |
|--|-----------|----------------|
| Rigidité diélectrique à 23°C et sous 1,013 bar |           | 1,3            |
| Indice de Kauri-butanol                        |           | 25             |
| Ratio Cp/Cv à 25°C sous 1,013 bar              |           | 1,185          |
| Inflammabilités dans l'air                     |           | in inflammable |
| Point éclair                                   |           | Néant          |
| Classification NF-EN 378                       |           | L1             |
| Potentiel d'action sur l'ozone                 | (R11 = 1) | 0,055          |

**Tableau .IV.1 : Propriétés du mélange frigorigène R-22**

D'après les conditions initiales les résultats de calcul sont :

➤ **Chambre froide positive**



**Solkane® 22**

**Processus à un niveau**

**Evaporateur**

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| Puissance frigorigifère | : 200 kW   |
| Température             | : 4,00 °C  |
| Surchauffe              | : 20,00 K  |
| Perte de charge         | : 0,00 bar |

**Liquéfacteur**

|                      |            |
|----------------------|------------|
| Température          | : 50,00 °C |
| Sous-refroidissement | : 0,00 K   |
| Perte de charge      | : 0,00 bar |

**Compresseur**

|                                     |                |                                       |            |
|-------------------------------------|----------------|---------------------------------------|------------|
| <b>Rendement isentropique</b>       | : <b>0,800</b> |                                       |            |
| <b>Conduite d'aspiration de gaz</b> |                | <b>Conduite de refoulement de gaz</b> |            |
| <b>Surchauffe</b>                   | : 0,00 K       | <b>Refroidissement</b>                | : 0,00 K   |
| <b>Perte de charge</b>              | : 0,00 bar     | <b>Perte de charge</b>                | : 0,00 bar |

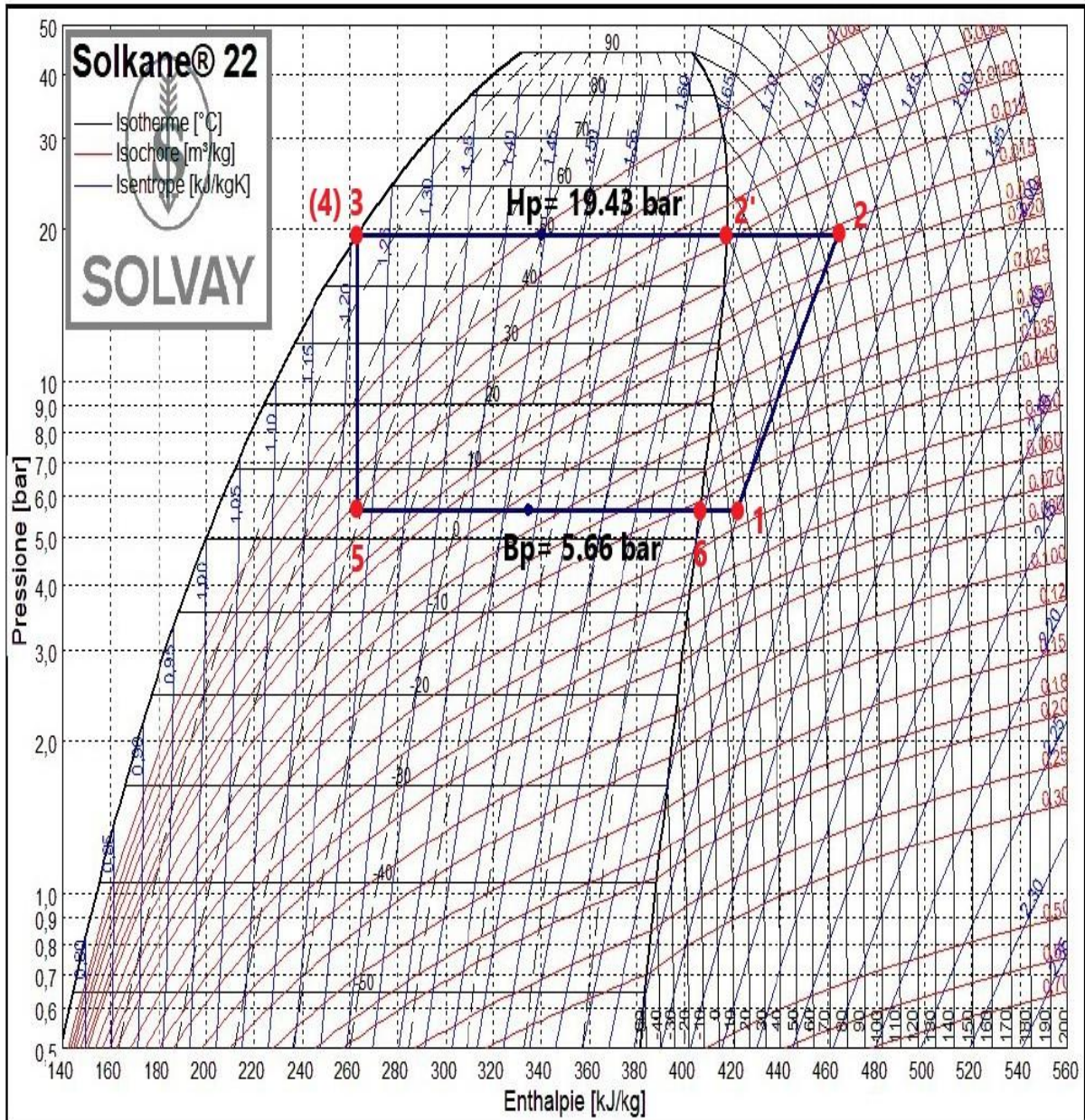
|       | p     | t     | v                   | h      | s        | x            |
|-------|-------|-------|---------------------|--------|----------|--------------|
| Point | bar   | °C    | dm <sup>3</sup> /kg | kJ/kg  | kJ/(kgK) | --           |
| 1     | 5,66  | 24,00 | 45,97               | 421,32 | 1,7968   |              |
| 2s    | 19,43 | 89,41 | 15,05               | 455,53 | 1,7968   |              |
| 2     | 19,43 | 99,06 | 15,76               | 464,09 | 1,8201   |              |
| 3     | 19,43 | 99,06 | 15,76               | 464,08 | 1,8201   |              |
| 3'    | 19,43 | 50,00 | 11,64               | 417,54 | 1,6857   |              |
| 3"4'm | 19,43 | 50,00 | 6,28                | 340,30 | 1,4467   |              |
| 4'    | 19,43 | 50,00 | 0,92                | 263,05 | 1,2076   |              |
| 4     | 19,43 | 50,00 | 0,92                | 263,05 | 1,2076   |              |
| 5     | 5,66  | 4,00  | 12,57               | 263,05 | 1,2276   | <b>0,289</b> |
| 56"m  | 5,66  | 4,00  | 27,06               | 334,70 | 1,4861   |              |
| 6"    | 5,66  | 4,00  | 41,54               | 406,36 | 1,7447   |              |
| 6     | 5,66  | 24,00 | 45,97               | 421,32 | 1,7968   |              |

**Puissances**

|              |           |
|--------------|-----------|
| Liquéfacteur | : 254 kW  |
| Compresseur  | : 54,0 kW |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| Conduite d'aspiration de gaz   | : 0,000 kW |
| Conduite de refoulement de gaz | : 0,000 kW |

|                             |                           |
|-----------------------------|---------------------------|
| Rapport de compression      | : 3,43                    |
| Différence de pression      | : 13,77 bar               |
| Débit massique              | : 1263,7 g/s              |
| Débit vol. (à l'aspiration) | : 209,1 m <sup>3</sup> /h |
| Capacité volumétrique       | : 3443 kJ/m <sup>3</sup>  |
| COP                         | : 3,70                    |



## ➤ Chambre froide négative



Solkane® 22

Processus à un niveau**Evaporateur**

|                        |            |
|------------------------|------------|
| Puissance frigorifique | : 200 kW   |
| Température            | : -7,00 °C |
| Surchauffe             | : 12,00 K  |
| Perte de charge        | : 0,00 bar |

**Liquéfacteur**

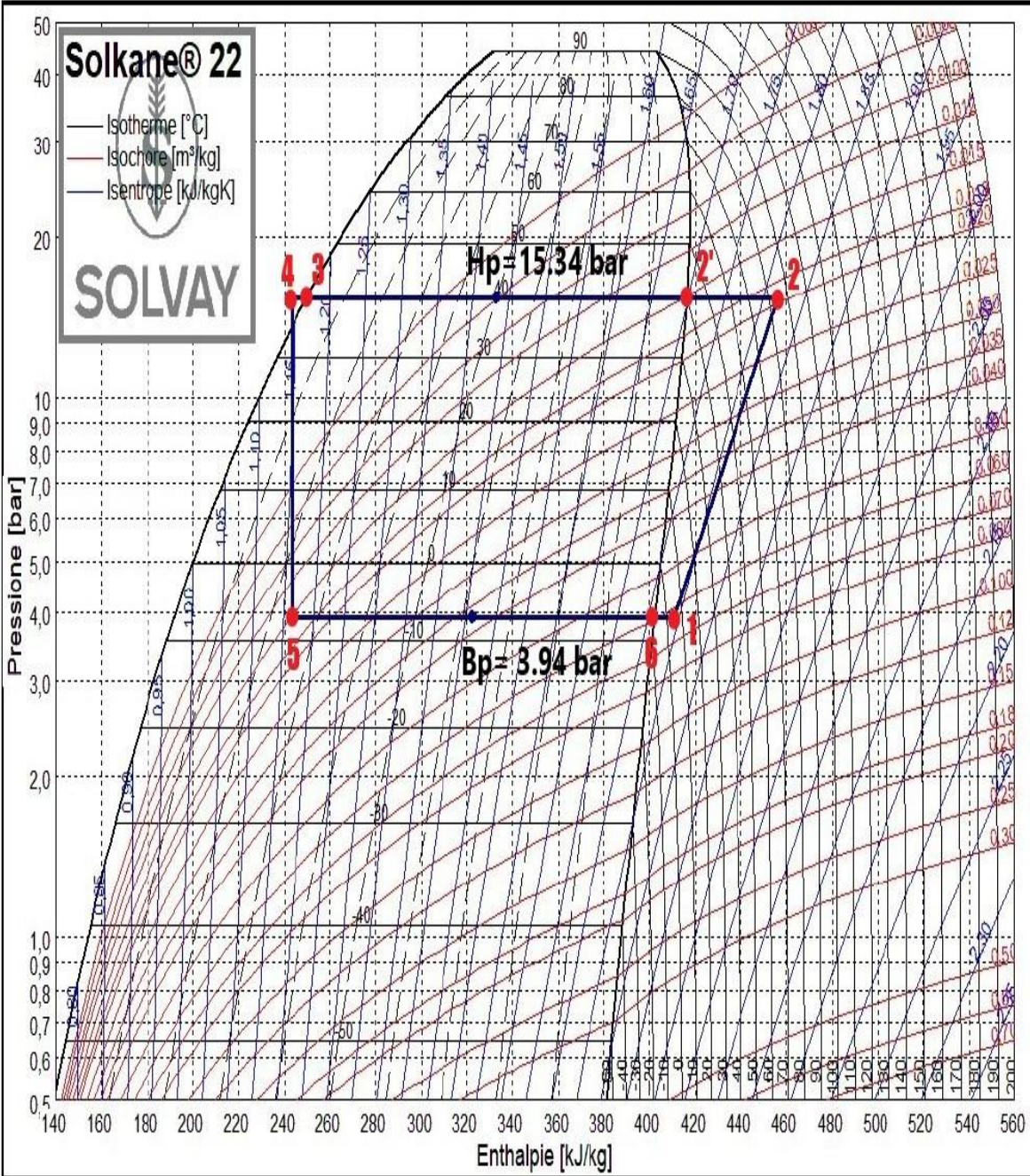
|                      |            |
|----------------------|------------|
| Température          | : 40,00 °C |
| Sous-refroidissement | : 5,00 K   |
| Perte de charge      | : 0,00 bar |

**Compresseur**

|                                     |          |          |                     |                                       |          |          |
|-------------------------------------|----------|----------|---------------------|---------------------------------------|----------|----------|
| <b>Rendement isentropique</b>       |          | 0,800    |                     |                                       |          |          |
| <b>Conduite d'aspiration de gaz</b> |          |          |                     | <b>Conduite de refoulement de gaz</b> |          |          |
| <b>Surchauffe</b>                   |          | 0,00 K   |                     | <b>Refroidissement</b>                |          | 0,00 K   |
| <b>Perte de charge</b>              |          | 0,00 bar |                     | <b>Perte de charge</b>                |          | 0,00 bar |
|                                     | <b>p</b> | <b>t</b> | <b>v</b>            | <b>h</b>                              | <b>s</b> | <b>x</b> |
| <b>Point</b>                        | bar      | °C       | dm <sup>3</sup> /kg | kJ/kg                                 | kJ/(kgK) | --       |
| 1                                   | 3,94     | 5,00     | 62,62               | 410,79                                | 1,7922   |          |
| 2s                                  | 15,34    | 73,93    | 18,57               | 447,05                                | 1,7922   |          |
| 2                                   | 15,34    | 84,55    | 19,51               | 456,11                                | 1,8179   |          |
| 3                                   | 15,34    | 84,55    | 19,51               | 456,11                                | 1,8179   |          |
| 3'                                  | 15,34    | 40,00    | 15,11               | 416,26                                | 1,6987   |          |
| 3"4'm                               | 15,34    | 40,00    | 8,00                | 332,94                                | 1,4326   |          |
| 4'                                  | 15,34    | 40,00    | 0,89                | 249,63                                | 1,1666   |          |
| 4                                   | 15,34    | 35,00    | 0,87                | 243,14                                | 1,1462   |          |
| 5                                   | 3,94     | -7,00    | 14,97               | 243,14                                | 1,1629   | 0,244    |
| 5"6'm                               | 3,94     | -7,00    | 36,96               | 322,70                                | 1,4619   |          |
| 6"                                  | 3,94     | -7,00    | 58,96               | 402,26                                | 1,7608   |          |
| 6                                   | 3,94     | 5,00     | 62,62               | 410,79                                | 1,7922   |          |

Puissance :

|                                |                         |
|--------------------------------|-------------------------|
| Liquéfacteur                   | 254 kW                  |
| Compresseur                    | 54,1 kW                 |
| Conduite d'aspiration de gaz   | 0,000 kW                |
| Conduite de refoulement de gaz | 0,000 kW                |
| Rapport de compression         | 3,89                    |
| Différence de pression         | 11,40 bar               |
| Débit massique                 | 1193,0 g/s              |
| Débit vol. (à l'aspiration)    | 268,9 m <sup>3</sup> /h |
| Capacité volumétrique          | 2677 kJ/m <sup>3</sup>  |
| COP                            | 3,70                    |



## IV.6. Le réfrigérant R-32

### a. Définition :

Le gaz réfrigérant **R-32** est un HFC pur, qui n'appauvrit pas la couche d'ozone et a un faible potentiel de réchauffement global. Il est utilisé sous sa forme pure dans les petits équipements de climatisation et de réfrigération neufs et est un composant couramment utilisé dans divers mélanges de HFC.

Le **R-32** est adapté aux nouveaux équipements spécialement conçus pour le R-32, dans des applications qui auraient normalement utilisé du R-410A.

Il a un PRG (GWP) de 675, ce qui est dans les limites acceptées pour les gaz réfrigérants utilisés dans les nouveaux équipements (split) avec une charge de moins de 3 kg mis sur le marché à partir du 1/01/2025 conformément au règlement européen CE n° 517-2014.

Voici quelques-unes de ses caractéristiques :

- C'est un réfrigérant plus efficace sur le plan énergétique que le R-410A et son PRG (GWP) est de 675, soit 68 % inférieur à celui du R-410A.
- Sa capacité de réfrigération est similaire à celle du R-22 et du R-502.
- L'équipement nécessite moins de charge de réfrigérant que le R-410A.
- Mêmes tuyauteries et lubrifiants (POE) que le R-410A.
- Classification de sécurité : A2L, faible toxicité et faible inflammabilité.

### b. Applications

- Initialement utilisé dans certains nouveaux équipements de climatisation, il commence à être également considéré comme une alternative à basse température.
- Il a été utilisé comme composant dans des mélanges de HFC bien connus par le secteur comme le R- 407C, le R-410A, le R-442A (RS-50), le R-407F, le R-453A (RS-70), etc.
- Le R-32 est classé comme inflammable, et n'est donc pas un réfrigérant conçu pour les reconversions (retro fit) du R-410A.

### c. Propriétés physiques



| Propriétés physiques                                  | Unités  | R-32                           |
|---|---------|--------------------------------|
| Formule   |         | CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> |
| Poids moléculaire                                     |         | 52.024                         |
| Densité du liquide (25 °C)                            | Kg/l    | 0.9588                         |
| Température d'ébullition à 1,013 bar                  | °C      | -51.7                          |
| Viscosité du liquide (20 °C)                          | cP      | 0.121                          |
| Viscosité de la vapeur (20 °C)                        | cP      | 0.01238                        |
| Tension superficielle (20 °C)                         | mN/m    | 7.0                            |
| Pression de vapeur (25 °C)                            | Bar     | 16,897                         |
| Chaleur spécifique du liquide (25 °C)                 | kJ/Kg.K | 1.884                          |
| Chaleur spécifique du vapeur (25 °C)                  | kJ/Kg.K | 0.82633                        |
| Point de congélation                                  | °C      | -136                           |
| Température critique                                  | °C      | 78,35                          |
| Pression critique                                     | Bar     | 58.16                          |
| Densité critique                                      | Kg/l    | 0.429756                       |
| Chaleur de vaporisation au point d'ébullition (25 °C) | kJ/kg   | 270.22                         |
| Densité de vapeur (Air = 1)                           |         | 1,86                           |
| Pression de vapeur à 20°C                             | mm Hg   | 10319                          |
| Densité du vapeur à 20°C                              | g/ml    | 0.98                           |
| Limites d'inflammation (supérieures)                  | % v/v   | 31.0 ASTM 681-85               |
| Limites d'inflammation (inférieures)                  | % v/v   | 14.0 ASTM 681-85               |
| Solubilité du R-32 dans l'eau à 25 ° C                | Log     | 0.21                           |
| COP   |         | 95                             |
| Inflammabilité  |         | A2L                            |
| ODP   |         | 0                              |
| GWP   |         | 675*                           |
| Toxicité  |         | Non                            |

Tableau .IV.2 : Propriétés du mélange frigorigène R-32

D'après les conditions initiales les résultats de calcul sont :

➤ **Chambre froide positive**



**Solkane® 32**

**Processus à un niveau**

**Evaporateur**

|                        |            |
|------------------------|------------|
| Puissance frigorifique | : 200 kW   |
| Température            | : 4,00 °C  |
| Surchauffe             | : 20,00 K  |
| Perte de charge        | : 0,00 bar |

**Liquéfacteur**

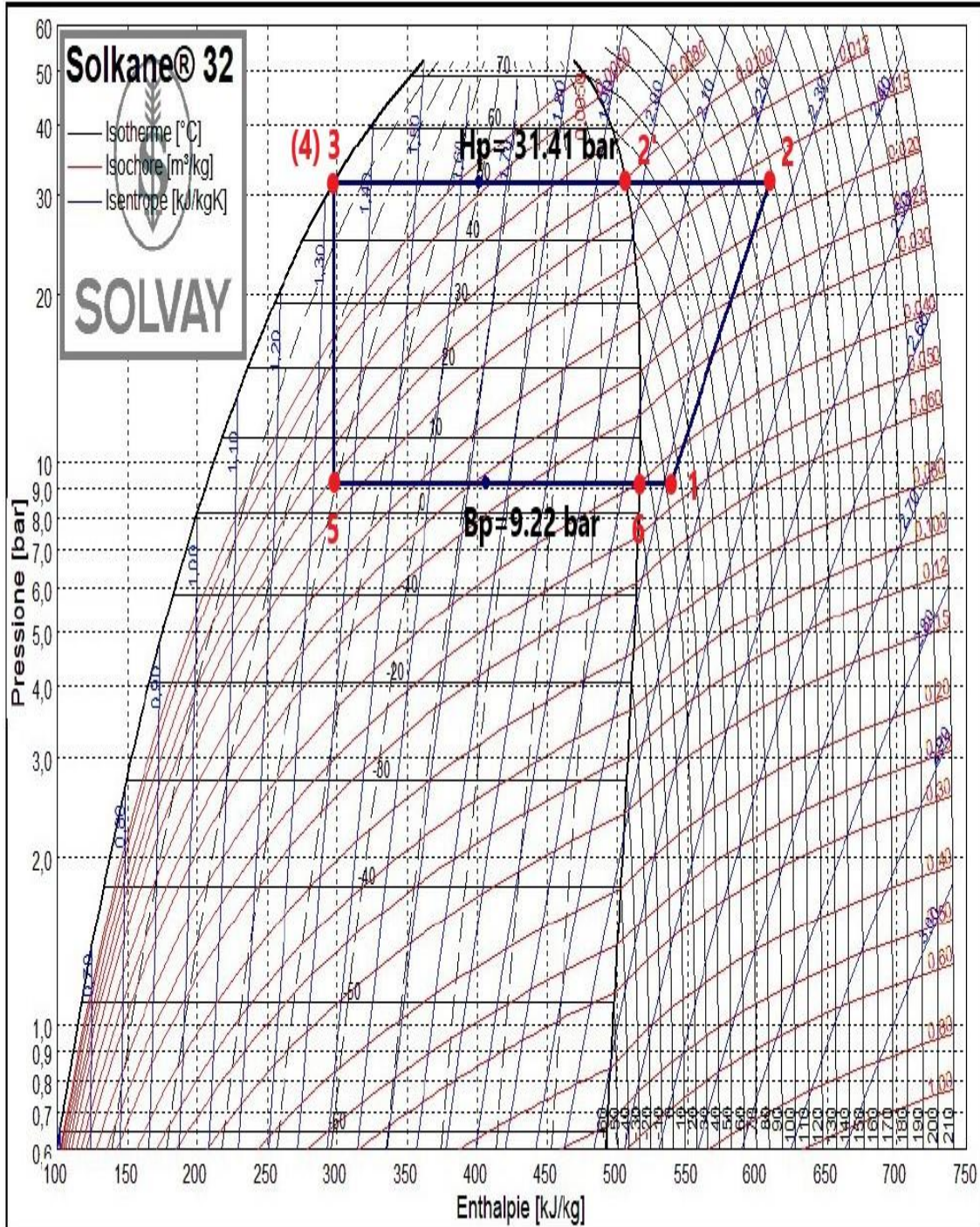
|                      |            |
|----------------------|------------|
| Température          | : 50,00 °C |
| Sous-refroidissement | : 0,00 K   |
| Perte de charge      | : 0,00 bar |

**Compresseur**

|                                     |                 |                |                    |                                       |                      |                |
|-------------------------------------|-----------------|----------------|--------------------|---------------------------------------|----------------------|----------------|
| <b>Rendement isentropique</b>       |                 | 0,800          |                    |                                       |                      |                |
| <b>Conduite d'aspiration de gaz</b> |                 | 0,00 K         |                    | <b>Conduite de refoulement de gaz</b> |                      | 0,00 K         |
| <b>Surchauffe</b>                   |                 | 0,00 bar       |                    | <b>Refroidissement</b>                |                      | 0,00 bar       |
| <b>Perte de charge</b>              |                 |                |                    | <b>Perte de charge</b>                |                      |                |
| <b>Point</b>                        | <b>p</b><br>bar | <b>t</b><br>°C | <b>v</b><br>dm³/kg | <b>h</b><br>kJ/kg                     | <b>s</b><br>kJ/(kgK) | <b>x</b><br>-- |
| 1                                   | 9,22            | 24,00          | 45,08              | 538,70                                | 2,2187               |                |
| 2s                                  | 31,41           | 106,32         | 15,98              | 594,97                                | 2,2187               |                |
| 2                                   | 31,41           | 117,47         | 16,84              | 609,03                                | 2,2552               |                |
| 3                                   | 31,41           | 117,47         | 16,84              | 609,03                                | 2,2552               |                |
| 3'                                  | 31,41           | 50,00          | 10,15              | 506,42                                | 1,9642               |                |
| 3*4'm                               | 31,41           | 50,00          | 5,67               | 401,92                                | 1,6408               |                |
| 4'                                  | 31,41           | 50,00          | 1,19               | 297,42                                | 1,3174               |                |
| 4                                   | 31,41           | 50,00          | 1,19               | 297,42                                | 1,3174               |                |
| 5                                   | 9,22            | 4,00           | 12,34              | 297,42                                | 1,3509               | 0,292          |
| 5*6'm                               | 9,22            | 4,00           | 26,11              | 406,70                                | 1,7452               |                |
| 6"                                  | 9,22            | 4,00           | 39,89              | 515,97                                | 2,1395               |                |
| 6                                   | 9,22            | 24,00          | 45,08              | 538,70                                | 2,2187               |                |

**Puissances**

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| <b>Liquéfacteur</b>                   | 258 kW     |
| <b>Compresseur</b>                    | 58,3 kW    |
| <b>Conduite d'aspiration de gaz</b>   | 0,000 kW   |
| <b>Conduite de refoulement de gaz</b> | 0,000 kW   |
| <b>Rapport de compression</b>         | 3,41       |
| <b>Différence de pression</b>         | 22,19 bar  |
| <b>Débit massique</b>                 | 828,9 g/s  |
| <b>Débit vol. (à l'aspiration)</b>    | 134,5 m³/h |
| <b>Capacité volumétrique</b>          | 5352 kJ/m³ |
| <b>COP</b>                            | 3,43       |



## ➤ Chambre froide négative



Solthane® 32

Processus à un niveau**Evaporateur**

|                        |            |
|------------------------|------------|
| Puissance frigorifique | : 200 kW   |
| Température            | : -7,00 °C |
| Surchauffe             | : 12,00 K  |
| Perte de charge        | : 0,00 bar |

**Liquéfacteur**

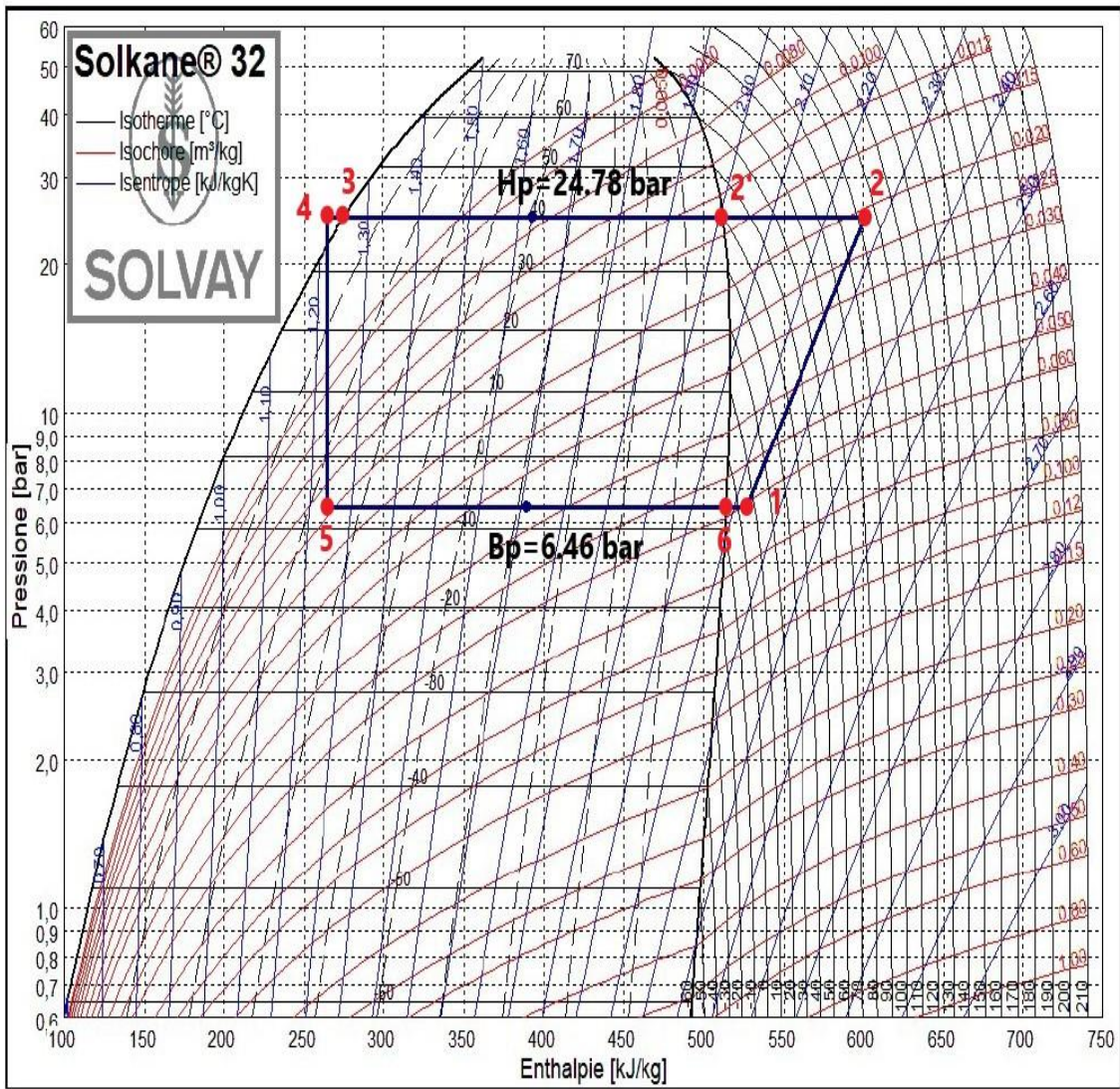
|                      |            |
|----------------------|------------|
| Température          | : 40,00 °C |
| Sous-refroidissement | : 5,00 K   |
| Perte de charge      | : 0,00 bar |

**Compresseur**

|                                     |       |          |                     |                                       |          |          |
|-------------------------------------|-------|----------|---------------------|---------------------------------------|----------|----------|
| <b>Rendement isentropique</b>       |       | 0,800    |                     |                                       |          |          |
| <b>Conduite d'aspiration de gaz</b> |       | 0,00 K   |                     | <b>Conduite de refoulement de gaz</b> |          | 0,00 K   |
| <b>Surchauffe</b>                   |       |          |                     | <b>Refroidissement</b>                |          |          |
| <b>Perte de charge</b>              |       | 0,00 bar |                     | <b>Perte de charge</b>                |          | 0,00 bar |
|                                     | p     | t        | v                   | h                                     | s        | x        |
| <b>Point</b>                        | bar   | °C       | dm <sup>3</sup> /kg | kJ/kg                                 | kJ/(kgK) | --       |
| <b>1</b>                            | 6,46  | 5,00     | 61,20               | 526,73                                | 2,2274   |          |
| <b>2s</b>                           | 24,78 | 91,73    | 19,84               | 586,42                                | 2,2274   |          |
| <b>2</b>                            | 24,78 | 104,08   | 21,00               | 601,34                                | 2,2676   |          |
| <b>3</b>                            | 24,78 | 104,08   | 21,00               | 601,34                                | 2,2676   |          |
| <b>3'</b>                           | 24,78 | 40,00    | 13,66               | 512,10                                | 2,0066   |          |
| <b>3"4'm</b>                        | 24,78 | 40,00    | 7,39                | 393,73                                | 1,6285   |          |
| <b>4'</b>                           | 24,78 | 40,00    | 1,12                | 275,35                                | 1,2505   |          |
| <b>4</b>                            | 24,78 | 35,00    | 1,09                | 265,07                                | 1,2185   |          |
| <b>5</b>                            | 6,46  | -7,00    | 14,19               | 265,07                                | 1,2453   | 0,236    |
| <b>56"m</b>                         | 6,46  | -7,00    | 35,60               | 389,55                                | 1,7130   |          |
| <b>6"</b>                           | 6,46  | -7,00    | 57,01               | 514,02                                | 2,1807   |          |
| <b>6</b>                            | 6,46  | 5,00     | 61,20               | 526,73                                | 2,2274   |          |

**Puissances**

|                                       |                         |
|---------------------------------------|-------------------------|
| <b>Liquéfacteur</b>                   | 257 kW                  |
| <b>Compresseur</b>                    | 57,0 kW                 |
| <b>Conduite d'aspiration de gaz</b>   | 0,000 kW                |
| <b>Conduite de refoulement de gaz</b> | 0,000 kW                |
| <b>Rapport de compression</b>         | 3,84                    |
| <b>Différence de pression</b>         | 18,32 bar               |
| <b>Débit massique</b>                 | 764,4 g/s               |
| <b>Débit vol. (à l'aspiration)</b>    | 168,4 m <sup>3</sup> /h |
| <b>Capacité volumétrique</b>          | 4276 kJ/m <sup>3</sup>  |
| <b>COP</b>                            | 3,51                    |



### IV.7. Le réfrigérant R-410A

#### a. Définition

Le R-410A est un mélange presque azéotropique composé par R-125 et R-32 ; qui actuellement s'utilise essentiellement dans les nouveaux équipements d'air conditionné qui sont mis dans le marché. C'est un produit chimiquement stable, avec un bas glissement de température (Glide) et basse toxicité. Malgré le caractère inflammable du R-32, la composition globale de ce mélange a été formulée pour obtenir un produit qui n'est pas inflammable, inclus en cas de fuites. C'est classé comme A1 group L1.

Le R-410A a une capacité de réfrigération et unes pressions beaucoup plus élevés que le R-22. Puisque ce produit n'est pas azéotropique, il doit se transvaser et chargé toujours en phase liquide.

Le R-410A n'est pas miscible avec les huiles minérales ; les huiles qui doivent être utilisés avec ce gaz réfrigérant sont les poly lesté (POE).

#### b. Propriétés physique

| Propriétés physiques                          | Unités               | R-410A |
|---|----------------------|--------|
| Poids moléculaire                             | (g/mol)              | 72.6   |
| Température d'ébullition à 1,013 bar          | (°C)                 | -51.58 |
| Glissement température ébullition à 1,013 bar | (K)                  | 0.1    |
| Température critique                          | (°C)                 | 72.13  |
| Pression critique                             | (bar abs)            | 49.26  |
| Densité critique                              | (Kg/m <sup>3</sup> ) | 488,90 |
| Densité du liquide (25 °C)                    | (Kg/m <sup>3</sup> ) | 1062   |
| Densité du liquide (-25 °C)                   | (Kg/m <sup>3</sup> ) | 1273   |
| Densité du vapeur saturé (25°C)               | (Kg/m <sup>3</sup> ) | 4,12   |
| Pression de vapeur (25 °C)                    | (bar abs)            | 16.5   |
| Pression de vapeur (-25 °C)                   | (bar abs)            | 3.30   |
| Chaleur de vaporisation au point d'ébullition | (KJ/Kg)              | 276    |
| Chaleur spécifique du liquide (25 °C)         | (KJ/Kg K)            | 1.84   |

|   |          |             |
|---|----------|-------------|
| Chaleur spécifique du vapeur (25°C) (1 atm)     | KJ/Kg K) | 0.83        |
| Conductivité thermique du liquide (25°C)        | (W/m.K)  | 0.088       |
| Conductivité thermique du vapeur (25°C) (1 atm) | (W/m.K)  | 0.013       |
| Solubilité dans l'eau (25°C)                    | ppm      | Négligeable |
| Limite d'inflammabilité                         | (% vol.) | Aucune      |
| Toxicité (AEL)                                  | ppm      | 1000        |
| ODP   | -        | 0           |
| GWP   | -        | 2088        |

**Tableau .IV.3 : Propriétés du mélange frigorigène R-410A**

D'après les conditions initiales les résultats de calcul sont :

➤ **Chambre froide positive**



**Solkane® 410A**

Processus à un niveau

Evaporateur  
 Puissance frigorifique : 200 kW  
 Température : 4,00 °C  
 Surchauffe : 20,00 K  
 Perte de charge : 0,00 bar

Liquéfacteur  
 Température : 50,00 °C  
 Sous-refroidissement : 0,00 K  
 Perte de charge : 0,00 bar

Compresseur  
 Rendement isentropique : 0,800

Conduite d'aspiration de gaz  
 Surchauffe : 0,00 K  
 Perte de charge : 0,00 bar

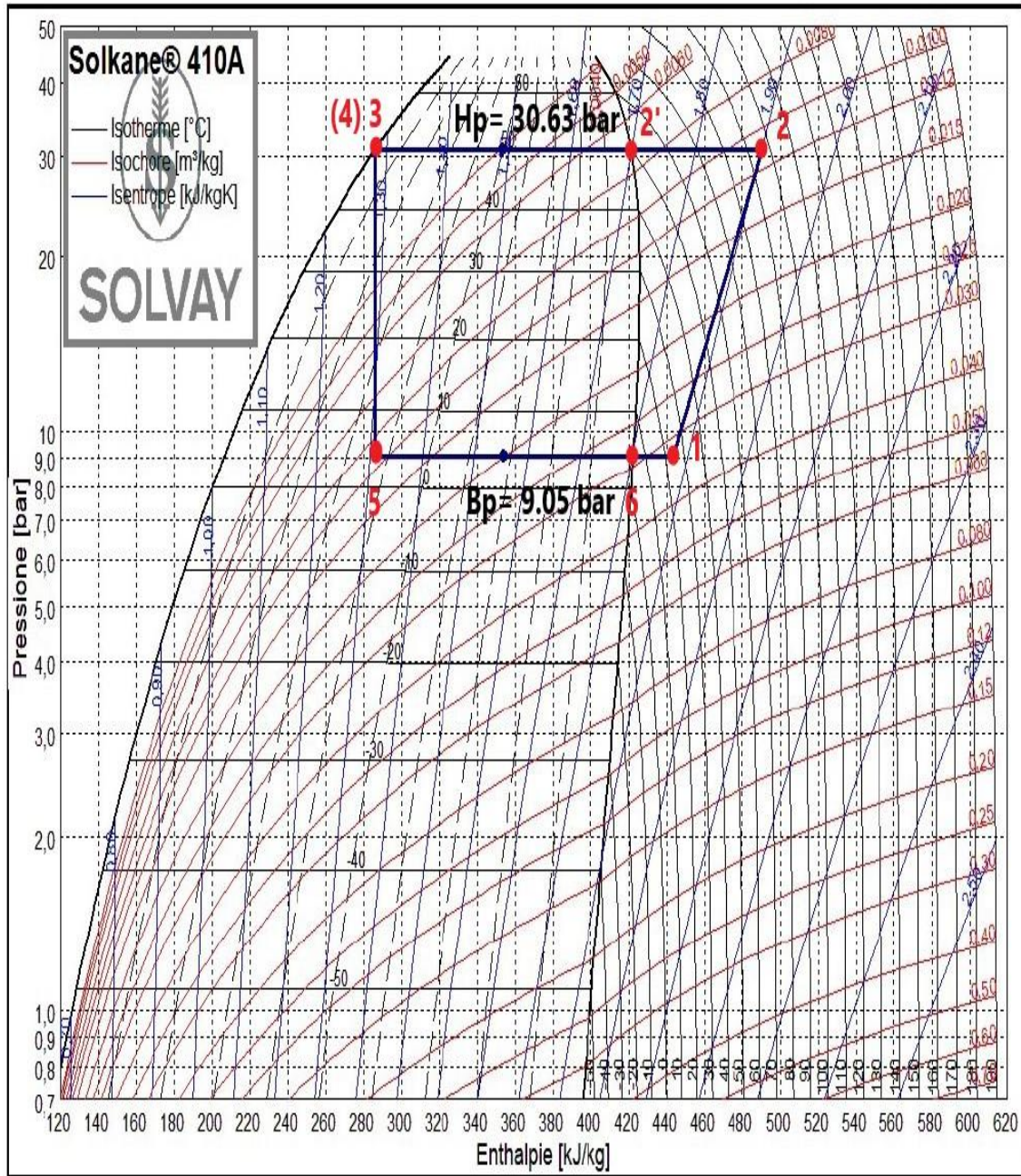
Conduite de refoulement de gaz  
 Refroidissement : 0,00 K  
 Perte de charge : 0,00 bar

| Point | p<br>bar | t<br>°C | v<br>dm³/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/(kgK) | x<br>-- |
|-------|----------|---------|-------------|------------|---------------|---------|
| 1     | 9,05     | 24,00   | 32,70       | 443,30     | 1,8752        |         |
| 2s    | 30,63    | 88,92   | 10,58       | 481,27     | 1,8752        |         |
| 2     | 30,63    | 96,57   | 11,08       | 490,77     | 1,9012        |         |
| 3     | 30,63    | 96,57   | 11,08       | 490,76     | 1,9012        |         |
| 3'    | 30,63    | 50,00   | 7,10        | 421,36     | 1,6993        |         |
| 3"4'm | 30,63    | 49,95   | 4,10        | 353,58     | 1,4900        |         |
| 4'    | 30,63    | 49,89   | 1,10        | 285,81     | 1,2806        |         |
| 4     | 30,63    | 49,89   | 1,10        | 285,81     | 1,2806        |         |
| 5     | 9,05     | 3,93    | 11,17       | 285,81     | 1,3092        | 0,369   |
| 56"m  | 9,05     | 3,97    | 19,98       | 354,06     | 1,5556        |         |
| 6"    | 9,05     | 4,00    | 28,80       | 422,32     | 1,8021        |         |
| 6     | 9,05     | 24,00   | 32,70       | 443,30     | 1,8752        |         |

Puissances  
 Liquéfacteur : 260 kW  
 Compresseur : 60,3 kW

Conduite d'aspiration de gaz : 0,000 kW  
 Conduite de refoulement de gaz : 0,000 kW

Rapport de compression : 3,38  
 Différence de pression : 21,58 bar  
 Débit massique : 1269,9 g/s  
 Débit vol. (à l'aspiration) : 149,5 m³/h  
 Capacité volumétrique : 4816 kJ/m³  
 COP : 3,32





## ➤ Chambre froide négative



Solthane® 410A

**Processus à un niveau****Evaporateur**

|                        |            |
|------------------------|------------|
| Puissance frigorifique | : 200 kW   |
| Température            | : -7,00 °C |
| Surchauffe             | : 12,00 K  |
| Perte de charge        | : 0,00 bar |

**Liquéfacteur**

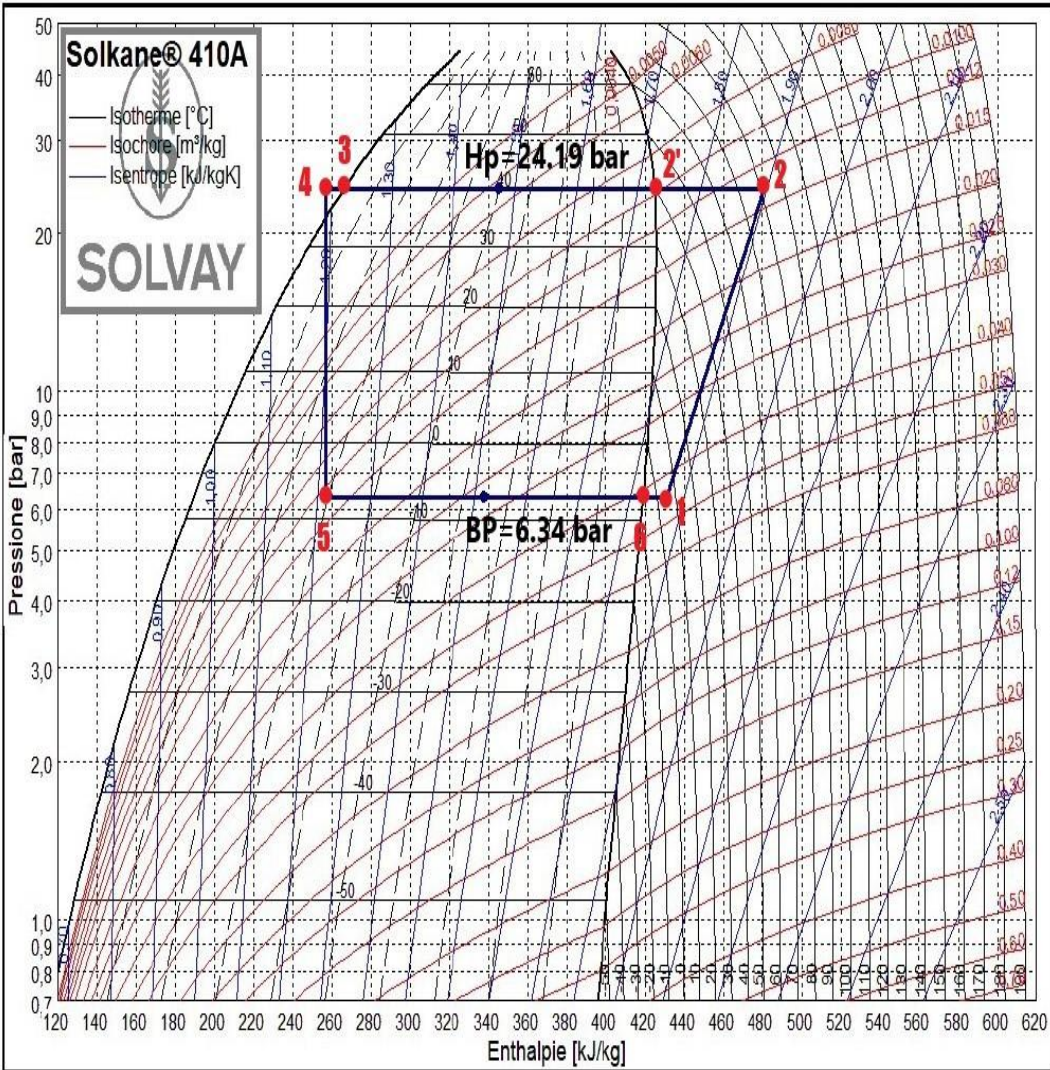
|                      |            |
|----------------------|------------|
| Température          | : 40,00 °C |
| Sous-refroidissement | : 5,00 K   |
| Perte de charge      | : 0,00 bar |

**Compresseur**

|                                     |       |          |                     |                                       |          |          |
|-------------------------------------|-------|----------|---------------------|---------------------------------------|----------|----------|
| <b>Rendement isentropique</b>       |       | 0,800    |                     |                                       |          |          |
| <b>Conduite d'aspiration de gaz</b> |       |          |                     | <b>Conduite de refoulement de gaz</b> |          |          |
| <b>Surchauffe</b>                   |       | 0,00 K   |                     | <b>Refroidissement</b>                |          | 0,00 K   |
| <b>Perte de charge</b>              |       | 0,00 bar |                     | <b>Perte de charge</b>                |          | 0,00 bar |
|                                     | p     | t        | v                   | h                                     | s        | x        |
| <b>Point</b>                        | bar   | °C       | dm <sup>3</sup> /kg | kJ/kg                                 | kJ/(kgK) | --       |
| 1                                   | 6,34  | 5,00     | 44,35               | 430,83                                | 1,8675   |          |
| 2s                                  | 24,19 | 73,05    | 13,05               | 470,98                                | 1,8675   |          |
| 2                                   | 24,19 | 81,47    | 13,72               | 481,02                                | 1,8961   |          |
| 3                                   | 24,19 | 81,47    | 13,72               | 481,02                                | 1,8961   |          |
| 3'                                  | 24,19 | 40,00    | 9,69                | 424,83                                | 1,7270   |          |
| 3"4'm                               | 24,19 | 39,94    | 5,36                | 345,45                                | 1,4738   |          |
| 4'                                  | 24,19 | 39,88    | 1,02                | 266,06                                | 1,2206   |          |
| 4                                   | 24,19 | 34,88    | 0,99                | 256,89                                | 1,1917   |          |
| 5                                   | 6,34  | -7,07    | 12,70               | 256,89                                | 1,2148   | 0,294    |
| 56"m                                | 6,34  | -7,04    | 26,96               | 337,97                                | 1,5195   |          |
| 6"                                  | 6,34  | -7,00    | 41,21               | 419,05                                | 1,8242   |          |
| 6                                   | 6,34  | 5,00     | 44,35               | 430,83                                | 1,8675   |          |

**Puissances**

|                                     |                         |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Liquéfacteur                        | 258 kW                  |
| Compresseur                         | 57,7 kW                 |
| <b>Conduite d'aspiration de gaz</b> |                         |
| Conduite de refoulement de gaz      | 0,000 kW                |
| <b>Rapport de compression</b>       |                         |
| Différence de pression              | 17,84 bar               |
| Débit massique                      | 1149,9 g/s              |
| Débit vol. (à l'aspiration)         | 183,6 m <sup>3</sup> /h |
| Capacité volumétrique               | 3922 kJ/m <sup>3</sup>  |
| COP                                 | 3,47                    |



## IV.8. Le réfrigérant R-152a

### a. Définition

R152a ou difluoroéthane est un réfrigérant écologique pour la réfrigération à température positive. Il peut être considéré comme remplaçant direct du R134a.

Le difluoroéthane est entièrement respectueux de la couche d'ozone. Il a un très faible potentiel de réchauffement planétaire (GWP) de seulement 124 (IPCC4). Enfin il permet une excellente efficacité énergétique.

### b. Applications

Le R152a est couramment utilisé comme propulseur d'aérosol, agent moussant ou comme composant dans plusieurs mélanges de réfrigérants. Cependant, il est classé comme légèrement inflammable par ASHRAE (classe A2). Il demande donc une adéquation des systèmes frigorifique en industrie et conditionne son utilisation dans les applications commerciales et ERP. Cependant, les préoccupations récentes concernant le réchauffement climatique, la réglementation des gaz fluorés en Europe et les taxes sur le carbone dans certains pays ont permis de récupérer l'intérêt pour les frigorigènes inflammables et les frigorigènes hautement toxiques comme l'ammoniac.

### c. Propriétés physiques

| Propriétés physiques                            | Unités               | R-152a |
|---|----------------------|--------|
| Poids moléculaire                               | (g/mol)              | 66,051 |
| Point d'ébullition (à 1,013 bar)                | (°C)                 | -24,7  |
| Point de congélation (à 1,013 bar)              | (°C)                 | -117   |
| Température critique                            | (°C)                 | 113,15 |
| Pression critique                               | (bar)                | 44,96  |
| Pression vapeur (25°C)                          | (bar)                | 5,08   |
| Densité liquide (25°C)                          | (kg/m <sup>3</sup> ) | 899    |
| Densité vapeur saturée                          | (kg/m <sup>3</sup> ) | 3,37   |
| Chaleur spécifique du vapeur (25°C a 1,013 bar) | (KJ/Kg.K)            | 1,051  |
| Solubilité dans l'eau (25°C)                    | (g/l)                | 0,2    |

|   |      |            |
|---|------|------------|
| Limite supérieure / inférieure d'inflammabilité | %    | 16,9 / 3,9 |
| Température d'auto-inflammation                 | (°C) | 440        |
| Inflammabilité                                  |      | Oui (A2)   |
| ODP   | -    | 0          |
| GWP   | -    | 124        |

**Tableau .IV.4 : Propriétés du mélange frigorigène R-152a**

D'après les conditions initiales les résultats de calcul sont :

➤ **Chambre froide positive**



**Solkane® 152a**

**Processus à un niveau**

**Evaporateur**

|                        |            |
|------------------------|------------|
| Puissance frigorifique | : 200 kW   |
| Température            | : 4,00 °C  |
| Surchauffe             | : 20,00 K  |
| Perte de charge        | : 0,00 bar |

**Liquéfacteur**

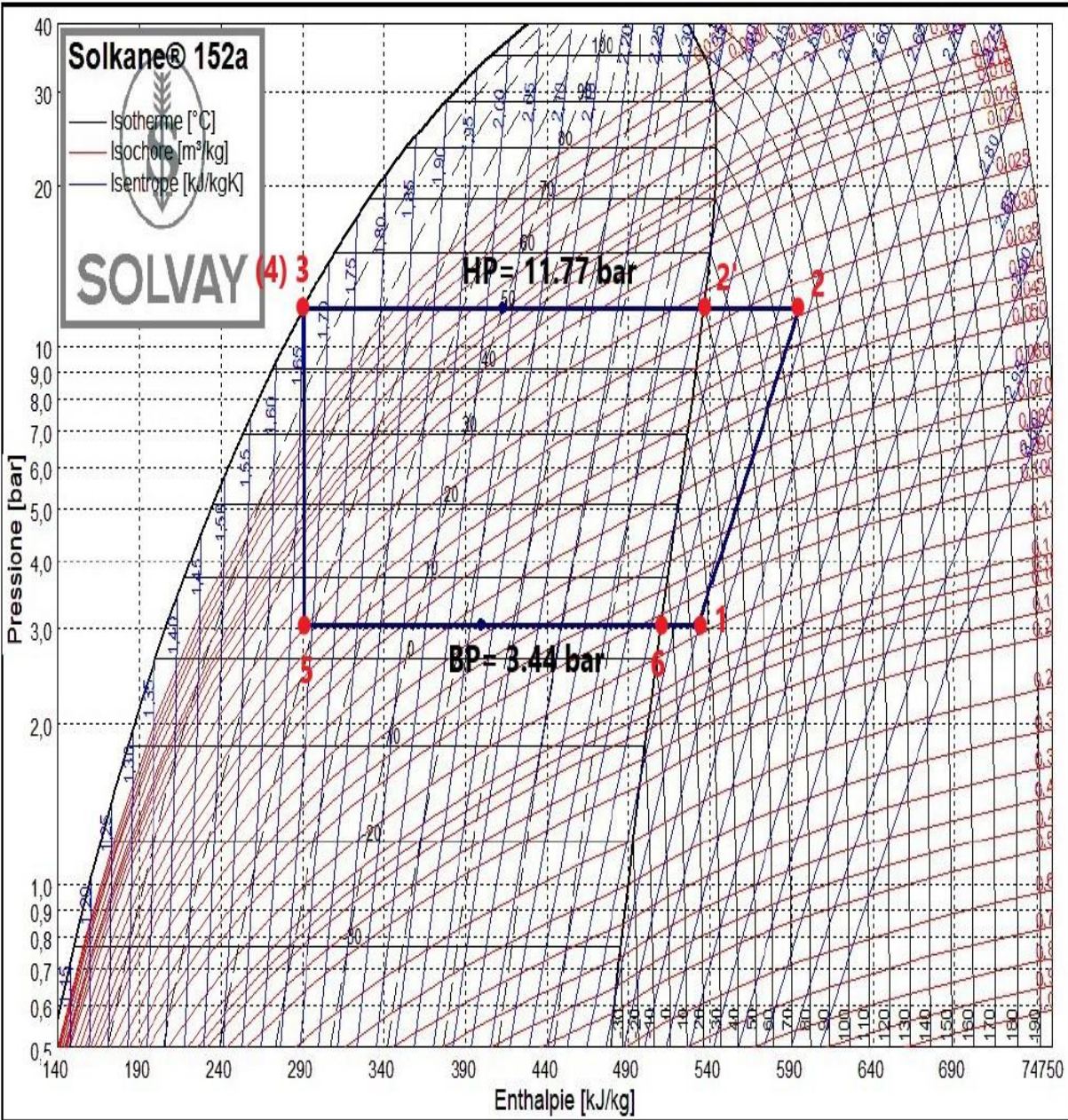
|                      |            |
|----------------------|------------|
| Température          | : 50,00 °C |
| Sous-refroidissement | : 0,00 K   |
| Perte de charge      | : 0,00 bar |

**Compresseur**

|                              |          |          |          |                                |          |          |
|------------------------------|----------|----------|----------|--------------------------------|----------|----------|
| Rendement isentropique       |          | 0,800    |          |                                |          |          |
| Conduite d'aspiration de gaz |          | 0,00 K   |          | Conduite de refoulement de gaz |          | 0,00 K   |
| Surchauffe                   |          | 0,00 bar |          | Refroidissement                |          | 0,00 bar |
| Perte de charge              |          | 0,00 bar |          | Perte de charge                |          | 0,00 bar |
|                              | <b>p</b> | <b>t</b> | <b>v</b> | <b>h</b>                       | <b>s</b> | <b>x</b> |
| <b>Point</b>                 | bar      | °C       | dm³/kg   | kJ/kg                          | kJ/(kgK) | --       |
| 1                            | 3,04     | 24,00    | 114,70   | 532,21                         | 2,5483   |          |
| 2s                           | 11,77    | 82,37    | 32,55    | 582,04                         | 2,5483   |          |
| 2                            | 11,77    | 91,47    | 33,93    | 594,50                         | 2,5829   |          |
| 3                            | 11,77    | 91,47    | 33,93    | 594,50                         | 2,5829   |          |
| 3*                           | 11,77    | 50,00    | 26,99    | 536,15                         | 2,4129   |          |
| 3*4'm                        | 11,77    | 50,00    | 14,10    | 413,33                         | 2,0328   |          |
| 4*                           | 11,77    | 50,00    | 1,20     | 290,50                         | 1,6527   |          |
| 4                            | 11,77    | 50,00    | 1,20     | 290,50                         | 1,6527   |          |
| 5                            | 3,04     | 4,00     | 29,64    | 290,50                         | 1,6790   | 0,276    |
| 56*m                         | 3,04     | 4,00     | 67,06    | 400,17                         | 2,0747   |          |
| 6*                           | 3,04     | 4,00     | 104,49   | 509,83                         | 2,4704   |          |
| 6                            | 3,04     | 24,00    | 114,70   | 532,21                         | 2,5483   |          |

**Puissances**

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| Liquéfacteur                   | 252 kW     |
| Compresseur                    | 51,5 kW    |
| Conduite d'aspiration de gaz   | 0,000 kW   |
| Conduite de refoulement de gaz | 0,000 kW   |
| Rapport de compression         | 3,87       |
| Différence de pression         | 8,73 bar   |
| Débit massique                 | 827,4 g/s  |
| Débit vol. (à l'aspiration)    | 341,7 m³/h |
| Capacité volumétrique          | 2107 kJ/m³ |
| COP                            | 3,88       |



## ➤ Chambre froide négative



## Solkane® 152a

Processus à un niveau**Evaporateur**

|                        |            |
|------------------------|------------|
| Puissance frigorifique | : 200 kW   |
| Température            | : -7,00 °C |
| Surchauffe             | : 12,00 K  |
| Perte de charge        | : 0,00 bar |

**Liquéfacteur**

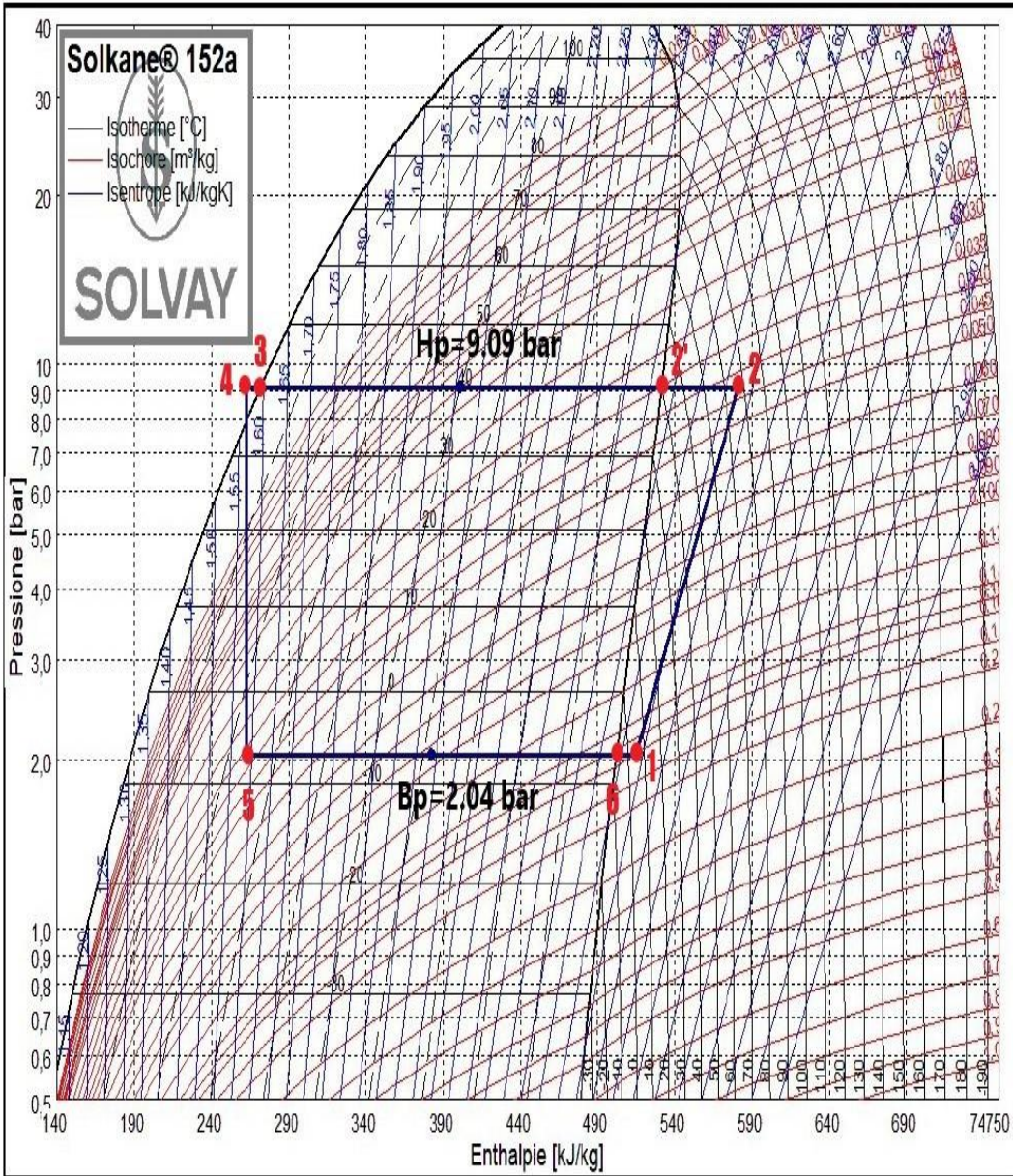
|                      |            |
|----------------------|------------|
| Température          | : 40,00 °C |
| Sous-refroidissement | : 5,00 K   |
| Perte de charge      | : 0,00 bar |

Compresseur

|                                     |          |          |                     |                                       |          |          |
|-------------------------------------|----------|----------|---------------------|---------------------------------------|----------|----------|
| <b>Rendement isentropique</b>       |          | 0,800    |                     |                                       |          |          |
| <b>Conduite d'aspiration de gaz</b> |          | 0,00 K   |                     | <b>Conduite de refoulement de gaz</b> |          | 0,00 K   |
| <b>Surchauffe</b>                   |          |          |                     | <b>Refroidissement</b>                |          |          |
| <b>Perte de charge</b>              |          | 0,00 bar |                     | <b>Perte de charge</b>                |          | 0,00 bar |
|                                     | <b>p</b> | <b>t</b> | <b>v</b>            | <b>h</b>                              | <b>s</b> | <b>x</b> |
| <b>Point</b>                        | bar      | °C       | dm <sup>3</sup> /kg | kJ/kg                                 | kJ/(kgK) | --       |
| <b>1</b>                            | 2,04     | 5,00     | 161,97              | 514,95                                | 2,5356   |          |
| <b>2s</b>                           | 9,09     | 67,09    | 41,02               | 567,83                                | 2,5356   |          |
| <b>2</b>                            | 9,09     | 77,15    | 42,93               | 581,05                                | 2,5739   |          |
| <b>3</b>                            | 9,09     | 77,15    | 42,93               | 581,05                                | 2,5739   |          |
| <b>3'</b>                           | 9,09     | 40,00    | 35,36               | 531,45                                | 2,4241   |          |
| <b>3"4'm</b>                        | 9,09     | 40,00    | 18,26               | 401,57                                | 2,0094   |          |
| <b>4'</b>                           | 9,09     | 40,00    | 1,16                | 271,68                                | 1,5946   |          |
| <b>4</b>                            | 9,09     | 35,00    | 1,15                | 262,43                                | 1,5652   |          |
| <b>5</b>                            | 2,04     | -7,00    | 37,14               | 262,43                                | 1,5878   | 0,237    |
| <b>56"m</b>                         | 2,04     | -7,00    | 95,16               | 382,32                                | 2,0383   |          |
| <b>6"</b>                           | 2,04     | -7,00    | 153,18              | 502,22                                | 2,4888   |          |
| <b>6</b>                            | 2,04     | 5,00     | 161,97              | 514,95                                | 2,5356   |          |

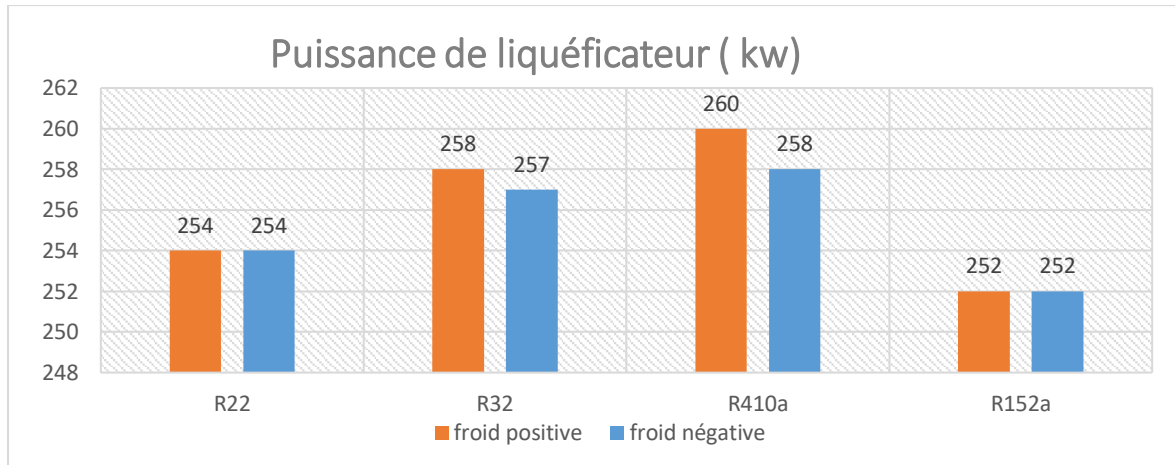
Puissances

|                                |                         |
|--------------------------------|-------------------------|
| Liquéfacteur                   | 252 kW                  |
| Compresseur                    | 52,4 kW                 |
| Conduite d'aspiration de gaz   | 0,000 kW                |
| Conduite de refoulement de gaz | 0,000 kW                |
| Rapport de compression         | 4,46                    |
| Différence de pression         | 7,06 bar                |
| Débit massique                 | 792,0 g/s               |
| Débit vol. (à l'aspiration)    | 461,8 m <sup>3</sup> /h |
| Capacité volumétrique          | 1559 kJ/m <sup>3</sup>  |
| COP                            | 3,82                    |



**IV.9. Comparaison entre les paramètres des fluides (froid positive / froid négative)**

- **La puissance de liquéfacteur**

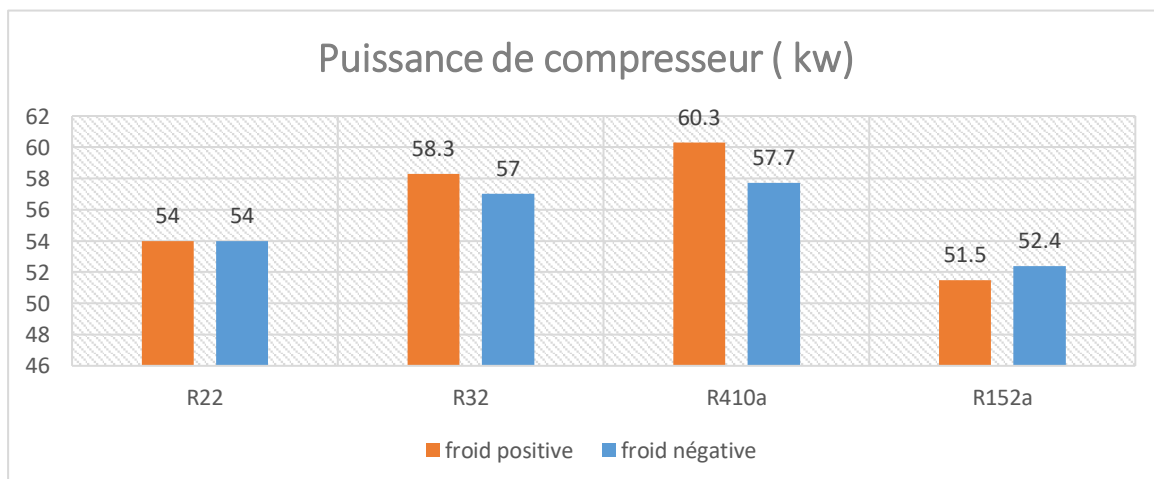


**Figure .IV.1 : Histogramme de puissance d'évaporateur**

Cet histogramme représente la consommation d'électricité par l'évaporateur entre les différents fluides, on observe que si la température de la chambre froide est élevée donc l'évaporateur possède plus d'énergie électrique.

Le réfrigérant R-410a c'est le plus consommateur et le réfrigérant R-152a c'est le moins consommateur d'électricité.

- **La puissance du compresseur**



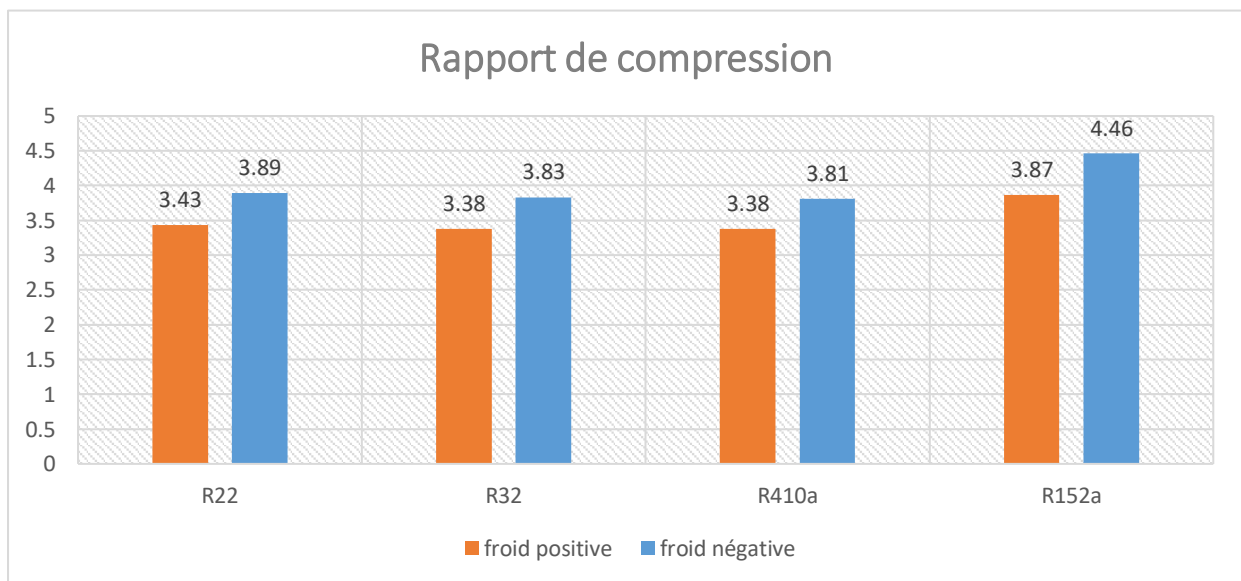
**Figure .IV.2 : Histogramme de puissance du compresseur**



Cet histogramme représente la consommation d'électricité par le compresseur entre les différents fluides, on observe que si la température de la chambre froide est élevée donc le compresseur possède plus d'énergie électrique, ça dépende les propriétés thermo dynamique de le réfrigérant.

Le réfrigérante R-410a c'est le plus consommateur et le réfrigérante R-152a c'est le moins consommateur d'électricité.

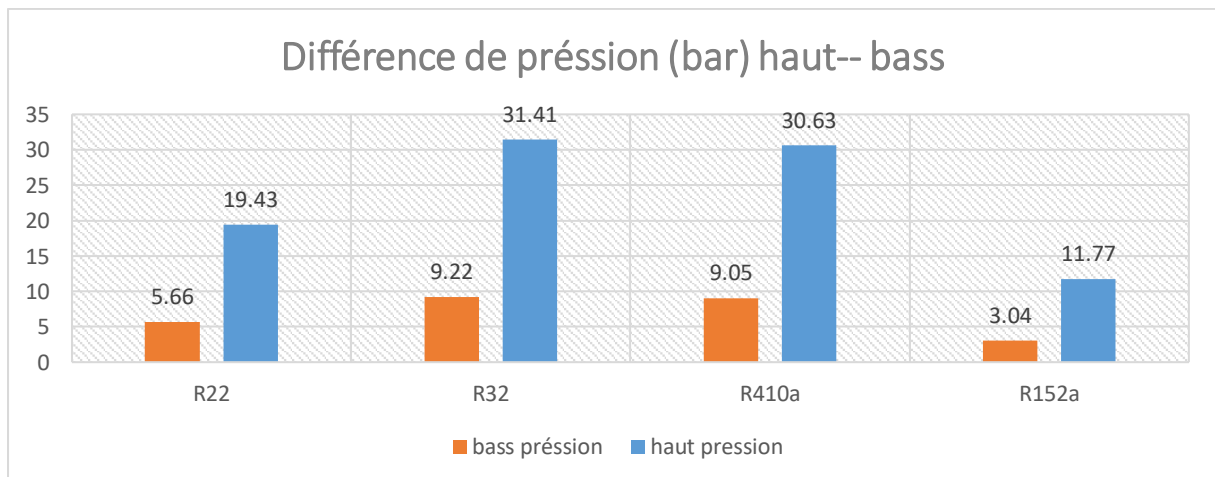
- **Le rapport de compression**



**Figure .IV.3 : Histogramme de rapport de compression**

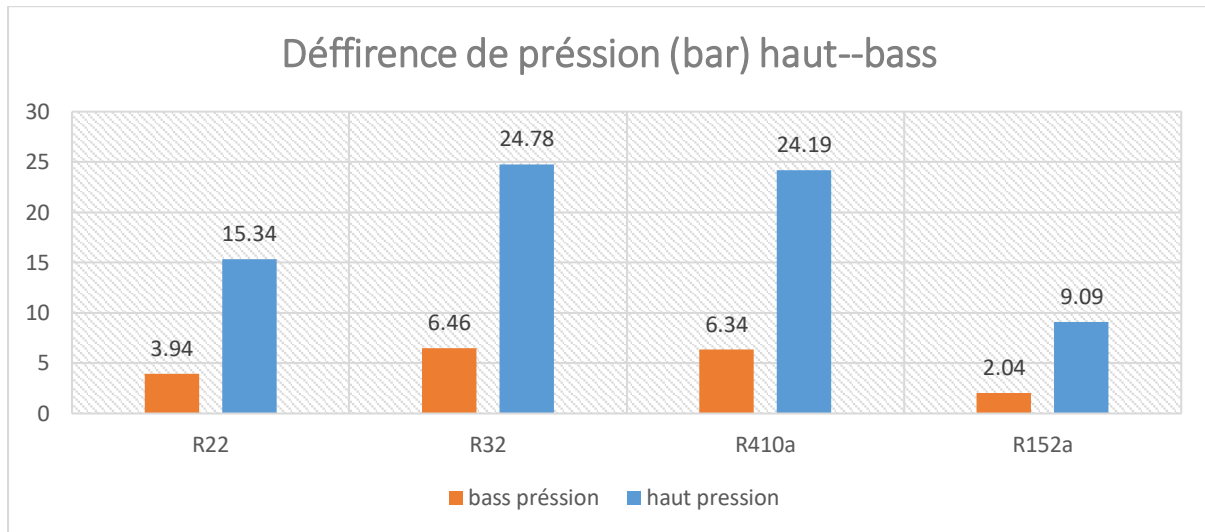
- **La déference de la compression Bass / Haut**

- **Chambre froid positive**



**Figure .IV.4 : Histogramme de différence des pressions haut - Bass**

➤ **Chambre froid négative**

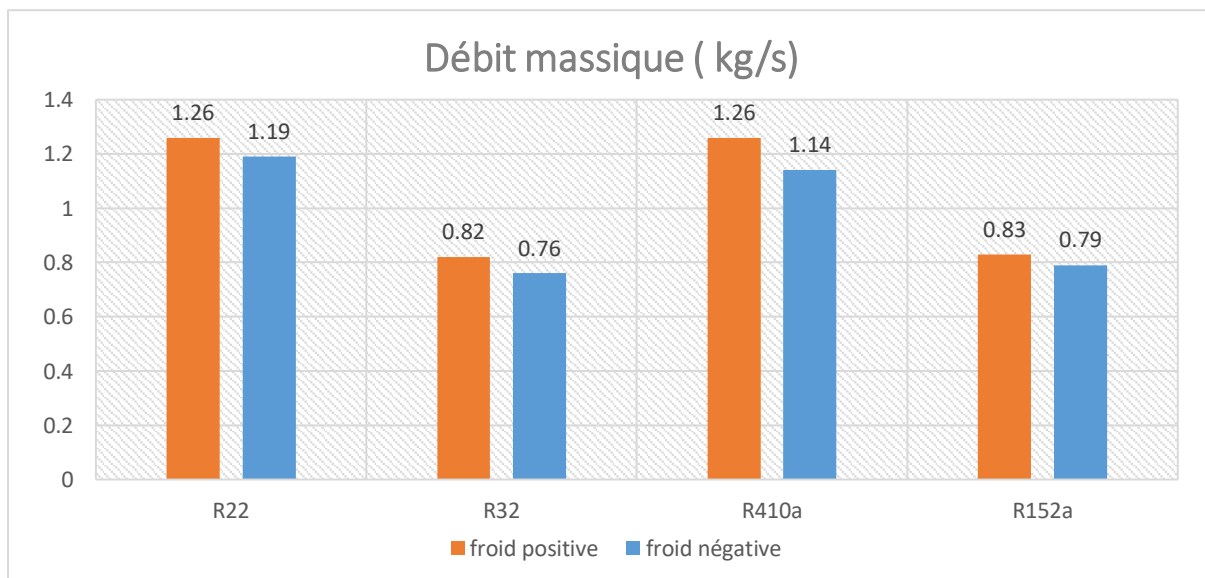


**Figure .IV.5 :** Histogramme de différence des pressions haut – Bass

Ces deux histogrammes représentent la variation des pressions entre les différents réfrigérantes, on observe que le taux de compression varié pour chaque fluide ca dépende les propriétés thermo dynamique de réfrigérante (température de saturation, pression,...etc.).

Le réfrigérante R-152a a la plus grande valeur de taux de compression et le mois valeur de haut et basse pression pour les deux cas froid positive ou négative.

- **Débit massique**

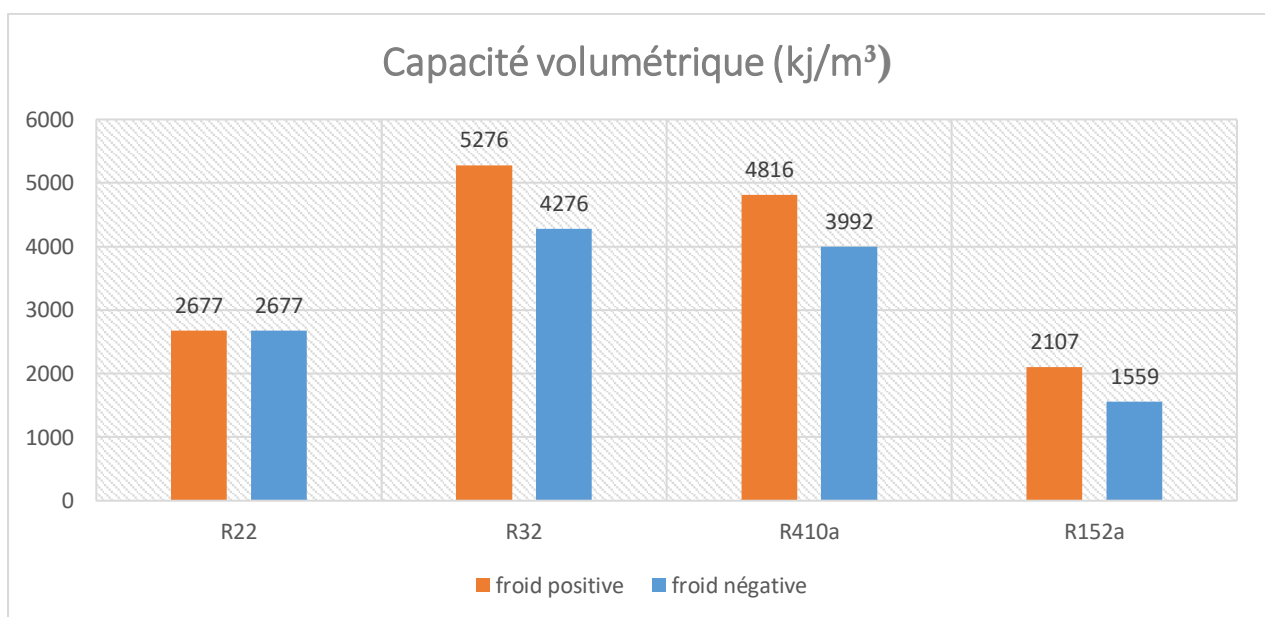


**Figure .IV.6 :** Histogramme de Débit massique

Cet histogramme représente le débit massique entre les différents fluides, on observe que le débit massique varié par rapporte la température de la chambre froide, et en trouve une relation entre eux si la température est élevée donc le débit massique est augmenté pour chaque type de réfrigérante ca dépende dimension de la conduite de cycle frigorifique et les propriétés thermo dynamique.

Le réfrigérante R-22 est le plus rapide dans tous les types de réfrigérante étudiée.

- **Capacité volumétrique**

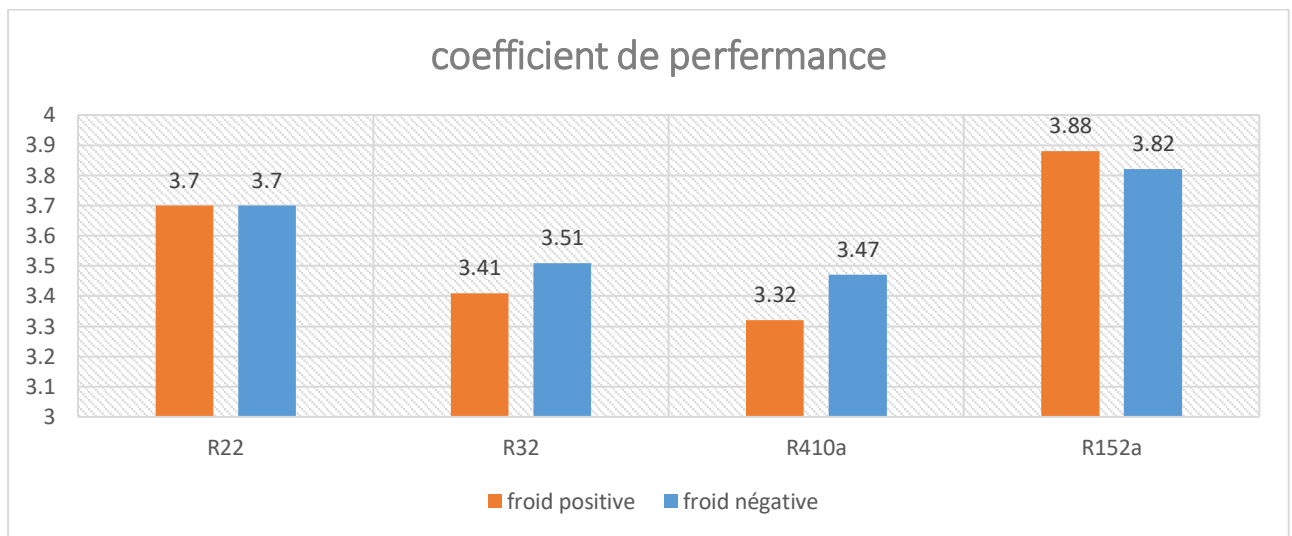


**Figure .IV.7 :** Histogramme des capacités volumétrique entre les différents fluides

Cet histogramme représente la variation de la capacité volumétrique entre les différents fluides, on observe que la capacité volumétrique varié par rapporte la température de la chambre froide, et en trouve une relation inverse entre eux si la température est élevée donc le débit massique est augmenté pour chaque type de réfrigérante ca dépende dimension de la conduite de cycle frigorifique et les propriétés thermo dynamique.

Le réfrigérante R-22 est le plus rapide dans tous les types de réfrigérante étudiée

- **Le coefficient de performance**



**Figure .IV.8 :** Histogramme de coefficient de performance entre les différents fluides

Cet histogramme représente le coefficient de performance entre les différents fluides, on observe que le COP varie par rapport à la température de la chambre froide.

Le réfrigérant R-152a a la plus grande valeur de COP, c'est-à-dire le réfrigérant le plus efficace et la même valeur de haut et basse pression pour les deux cas de froid positif ou négatif.

#### IV.10. Impact des réfrigérants sur l'environnement

| Réfrigérant | R-22  | R-32 | R-410A | R-152A |
|-------------|-------|------|--------|--------|
| ODP         | 0.055 | 0    | 0      | 0      |
| GWP         | 1801  | 675  | 2088   | 124    |

**Tableau .IV.5 :** Facteur d'impact sur la couche d'ozone (ODP) et de réchauffement climatique (GWP)

- **ODP (Ozone Déplétion Potentiel ou Potentiel d'appauvrissement de l'ozone)**

C'est un indice qui classe la nocivité d'un composé chimique par apport à la couche d'ozone. Cet indice est calculé par rapport à une molécule de référence, à savoir le R11 qui a un ODP = 1. Ne concerne que les fluides contenant du chlore (CFC, HCFC).

On observe que le R-22 a la plus grande valeur de ODP car le réfrigérant contient du chlore.

- **GWP (Global Warming Potentiel ou Potentiel de réchauffement global)**

Cet indice caractérise l'action d'un composé chimique sur l'effet de serre. La molécule de référence est le CO<sub>2</sub> qui a un GWP = 1 pour des durées bien déterminées généralement 100 ans. Plus cet indice est élevé plus le composé est néfaste.

On observe que le R-22 a la plus grande valeur aussi de GWP donc est un réfrigérant néfaste à l'environnement.

#### IV.11. Conclusion

Cette expérience représente les différentes performances entre les fluides frigorigènes dans les cas du froid positif et négatif.

On remarque que le réfrigérant R-152a c'est le meilleur choix pour la production du froid son impact sur l'environnement, à cause de l'efficacité (COP) et les indices de ODP et GWP.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Le but de ce travail est étudiée la chambre froide et choisir le meilleur réfrigérant pour l'installation frigorifique et leur impact sur l'environnement, c'est pour cela nous ferons des calculs et comparais entre les performances des différents fluides frigorigènes.

Nous pouvons constater avec évidence que les hydrocarbures ont de meilleures performances frigorifiques que les autres fluides frigorigènes. En effet, en raison de leur chaleur latente de vaporisation qui est plus importante et leur pression d'utilisation plus faible. De ce fait on remarque que le coût d'utilisation des installations fonctionnant aux hydrocarbures est plus faible. Cependant, du fait qu'ils soient extrêmement inflammables, ils présentent des risques de danger pour l'homme et les éléments qui entourent l'installation en cas de fuites de celle-ci.

C'est pourquoi ils sont soumis à des normes particulières comme l'interdiction de machines utilisant ces hydrocarbures dans les établissements recevant du public (ERP) ou encore une quantité de gaz limité dans les installations frigorifiques. Pour cette raison ces hydrocarbures sont le plus souvent utilisés dans les appareils domestiques comme les réfrigérateurs, les caves à vins, dont les installations sont de petites tailles. Malgré leur grande inflammabilité, l'isobutane et le propane répondent tout de même à la majorité des critères de sélection d'un bon fluide frigorigène.

# **Références bibliographiques**



### Références bibliographiques

- [1] Belkahlawali et Chibane Abderrahim] Djadi kamilia, Toudertsousene, caractérisation et conception d'un système de réfrigération, juin 2015
- [2] Belkahlawali et Chibaneabderahim], jean desmons, aide-mémoire, froid industriel
- [3] G. LAVERTU, BUP n° 719, p. 1491 (1989).
- [4] <https://www.techno-science.net/definition/3334.html>
- [5] [www.alloprof.qc.ca](http://www.alloprof.qc.ca)
- [6] Othman Jaber, MEUNIER.F, KOUSCHIC.S.C Comparative thermodynamic study of sorption systems, second LAN analysis. In.J. of Refrigeration, Vol 19, 1996, GB;
- [7] Dewey, D.H. 1983. Controlled atmosphere storage of fruits and vegetables .In S. Thorn, ed., Developments in food preservation .London: applied science
- [8] Marie Claudelotie, cours générales le froid, cours industriels, 2007bruxcel, Belgique
- [9] DERGHOUT.Z : mémoire de magister, investigation du cycle de réfrigération à éjecto-compression et ses application dans le froid, le chaud et l'énergie, Université Mentouri Constantine2077.P17,18,19,20,43,44,100,101 ,102,103,104,105.
- [10] Mr. BOUNOUIOUA Ahmed, Maxime DUMINIL. Théorie des machines frigorifiques. Techniques de l'ingénieur, Dossier B9730, (1996).
- [11] <https://www.mecalux.fr/>
- [12] <http://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaleur/technique-generalites/cycle.html>
- [13] Guerbouz Younes, Zine Soufaine, Amélioration de l'efficacité des machines frigorifiques au CO2 à l'aide d'un éjecteur/Abdelkader BOUZIANE/ mémoire magistère 2009/ École Doctorale en Énergétique et Développement Durable
- [14] <http://dicens.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/criteres-choix.html>
- [15] <https://www.energie-environnement-upmc.fr/userfiles/file/cours/Licence/LA3MJ/machine-Frigo.pdf>
- [16] Othman jabler, chambre froide, institut des sciences appliquées et économiques centre du Liban associe au CNAM, juillet 2013.

## Références bibliographiques

---

- [17] Marie Claude lotie, cours générales le froid, cours industriels, 2007 bruxcel, Belgique
- [18] [https://www.greentechjournal.fr/fonctionnement-chambre-froide/#Comment\\_fonctionne\\_une\\_chambre\\_froide](https://www.greentechjournal.fr/fonctionnement-chambre-froide/#Comment_fonctionne_une_chambre_froide)
- [19] <https://www.hvac-intelligence.fr/fonctionnement-chambre-froide/>
- [20] <https://www.dhcnews.com/comment-fonctionne-chambre-froide/>
- [21] Mémoire -Technique du froid Cours de base, CFmnLog, juillet 2007
- [22] UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP / ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES / PFE : conception d'une petite unité de fabrique de glace en écaille de haute qualité / DATE : Juillet 1993.
- [23] [technologie-des-installations-frigorifiques-1--pierre-rapin-patrick-jacquard-jean-desmons-dunod](#)
- [24] Site internet [http:// Technologie Production Froid.PDF. Com](http://Technologie Production Froid.PDF. Com).
- [25] <https://colddistribution.fr/content/9-comment-installer-une-chambre-froide>
- [26] [technologie-des-installations-frigorifiques-1--pierre-rapin-patrick-jacquard-jean-desmons-dunod](#)
- [27] <https://www.xpair.com/lexique/definition/evaporateur.htm>
- [28] <https://www.abcclim.net/detendeur.html>
- [29] <https://www.abcclim.net/bouteille-reservoir-liquide.html>
- [30] Technique du froid Cours de base, CFmnLog, juillet 2007
- [31] <https://www.abcclim.net/bouteille-acl.html>
- [32] <https://www.abcclim.net/voyant-liquide.html>
- [33] <https://formation.xpair.com/cours/deshydrateur.htm>
- [34] <https://www.abcclim.net/vanne-electromagnetique-solenoid.html>
- [35] <https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/upload/docs/application/pdf/2015-03/pressostats.pdf>
- [36] <https://www.abcclim.net/separateur-piege-huile.html>

## Références bibliographiques

---

- [37] <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-thermostat-10937/>
- [38] [https://www.carly-sa.fr/wp-content/uploads/2018/09/EVCYDEAC\\_DOCTEC\\_12\\_07\\_FR.pdf](https://www.carly-sa.fr/wp-content/uploads/2018/09/EVCYDEAC_DOCTEC_12_07_FR.pdf)
- [39] [https://www.e-genieclimatique.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/03/08\\_Armoire\\_electrique\\_chambre\\_froide.jpg](https://www.e-genieclimatique.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/03/08_Armoire_electrique_chambre_froide.jpg)
- [40] [https://manuelnumeriquemax.belin.education/physique\\_chimie-seconde/topics/phychi2-c07-114-a\\_effets-thermiques-des-transformations-physiques-cours](https://manuelnumeriquemax.belin.education/physique_chimie-seconde/topics/phychi2-c07-114-a_effets-thermiques-des-transformations-physiques-cours)
- [41] <http://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/04/DARAGLIA-IMED-EDDINE.pdf>
- [42] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d6/Cycle\\_machine\\_thermique.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d6/Cycle_machine_thermique.png)
- [43] <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-4-hqe/principe-production-froid-cycle-tritherme.php>
- [44] <https://www.lepanneausolaire.net/la-climatisation-solaire-par-absorption.php>
- [45] <https://www.mecalux.fr/>
- [46] <https://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaleur/technique-generalites/cycle.html>
- [47] [interclima.com](http://interclima.com) fluide-frigorigène
- [48] <https://sites.google.com/site/gbfroid/home/00-3>
- [49] <https://www.iceshop.fr/guide/comment-fonctionne-un-moteur-de-chambre-froide/>
- [50] <http://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/02/Bouchakhchoukha-Sawsen.pdf>
- [51] <https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/production-de-froid/machine-frigorifique-a-ab-adsorption/>
- [52] [technologie-des-installations-frigorifiques-1--pierre-rapin-patrick-jacquard-jean-desmons-dunod](http://technologie-des-installations-frigorifiques-1--pierre-rapin-patrick-jacquard-jean-desmons-dunod)
- [53] Site internet [http:// Technologie Production Froid.PDF. Com](http://Technologie Production Froid.PDF. Com).
- [54] <https://colddistribution.fr/content/9-comment-installer-une-chambre-froide>
- [55] <https://www.xpair.com/lexique/definition/evaporateur.htm>
- [56] <https://www.abcclim.net/detendeur.html>

## Références bibliographiques

---

- [57] <https://www.abcclim.net/bouteille-reservoir-liquide.html>
- [58] <https://www.abcclim.net/bouteille-acl.html>
- [59] <https://www.abcclim.net/voyant-liquide.html>
- [60] <https://formation.xpair.com/cours/deshydrateur.htm>
- [61] <https://www.abcclim.net/vanne-electromagnetique-solenoid.html>
- [62] <https://www.abcclim.net/separateur-piege-huile.html>
- [63] <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-thermostat-10937/>
- [64] [https://www.carly-sa.fr/wp-content/uploads/2018/09/EVCYDEAC\\_DOCTEC\\_12\\_07\\_FR.pdf](https://www.carly-sa.fr/wp-content/uploads/2018/09/EVCYDEAC_DOCTEC_12_07_FR.pdf)
- [65] [https://www.e-genieclimatique.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/03/08\\_Armoire\\_electrique\\_chambre\\_froide.jpg](https://www.e-genieclimatique.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/03/08_Armoire_electrique_chambre_froide.jpg)
- [66] <https://www.lyc-diderot.ac-aix-marseille.fr/elevés/cours/bts-tp-bat/thermo.htm>