

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana



**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de la Technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Etude  
Pour l'obtention du diplôme de

**Master**

En

« Filière : Génie Mécanique »

« Spécialité : Energétique »

**THÈME :**

**Etude d'une Machine Frigorifique  
Pour la Production de Cube de Glace**

Réalisé par

- CHERCHEL Abdallah
- BELLALI Mohamed Islam

Encadré par

Dr. BILAL ABDEREZZAK

Année Universitaire : 2016/2017

# Dédicaces

*Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur, de lever mes mains vers le ciel et de dire.*

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère.*

*A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études,*

*A Ma chère mère pour son affection, son amour et son soutien pendant les années d'étude du primaire jusqu'à l'université.*

*A mon chère père qui à consentit tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but.*

*A mes frères.*

*A mes toutes mes amies.*

*A mes toutes mes collègues.*

*A tous ceux qui me sont chères.*

*A tous ceux qui m'aiment.*

*A mon binôme et sa famille a tous ceux qui me son chers Je dédie ce modeste travail*

*Je dédie ce travail.*

*Bellali Mohamed islam*

# Dédicaces

*Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur, de lever mes mains vers le ciel et de dire.*

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère.*

*A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études,*

*A Ma chère mère pour son affection, son amour et son soutien pendant les années d'étude du primaire jusqu'à l'université.*

*A mon chère père qui a consentit tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but.*

*A mes frères.*

*A mes sœurs.*

*A mes toutes mes amies.*

*A mes toutes mes collègues.*

*A tous ceux qui me sont chères.*

*A tous ceux qui m'aiment.*

*A mon binôme et sa famille a tous ceux qui me son chers Je dédie ce modeste travail*

*Je dédie ce travail.*

*Cherchel Abdallah*

# REMERCIEMENTS

*Je Remercie avant tout DIEU le tout puissant qui m'a donné la foi, le courage et la volonté de mener à bien ce modeste travail*

*Mes Respectueux Remerciements s'adressent à mon encadreur de mémoire M. Bilal ABDEFEZZAK pour m'avoir dirigé durant ce travail et pour ces précieux conseils. Je tiens également à le remercier pour la sympathie qu'il m'a témoignée au cours de ce travail.*

*Je Remercie également tout les membres de jury, pour avoir accepté de juger ce modeste travail.*

*Enfin, Je Tiens à Remercier très chaleureusement tous les enseignants de faculté des sciences et de la technologie. Et en particulier Ceux de la "Spécialité d'Energétique" qui ont contribué à ma formation tout au long de mes études.*

## **Résumé**

*L'objectif dans ce travail est de faire une étude sur l'un des moyens qui produisent la glace avec une réalisation d'une machine frigorifique que nous avons suivie avec un stage pratique dans la période de la réalisation.*

*La machine frigorifique est réalisée selon un plan de travail étudié auparavant d'un point de vue technique et chronologique, et pour commencer notre réalisation nous avons choisi tout ce qui est lié avec l'installation comme des organes nécessaires et des équipements spéciaux pour nous attendre à des résultats escomptés.*

*Dans l'installation frigorifique le fluide frigorigène joue un rôle très important pour le fonctionnement du cycle et leur caractéristique thermodynamique varie selon la nature du fluide utilisé.*

*En général les résultats que nous avons obtenus sont juste des quelques détails pour faire bien comprendre l'étude frigorifique et mécanique avec un bilan énergétique pour nous offrir des quelques propositions ce qui concerne l'installation frigorifique pour la production de la glace.*

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو القيام بدراسة حول وسيلة من الوسائل التي تنتج الجليد مع تجسيد واحدة من آلة التبريد التي نتبعها مع فترة تدريب في فترة التحقيق.

يتم تنفيذ آلة التبريد وفقا لخطة العمل التي سبق دراستها فنيا وزمنيا، حيث نبدأ تنفيذنا بعد اختيار كل ما هو متصل مع التثبيت و اختيار الهيئات اللازمة والمعدات الخاصة للوصول إلى النتائج المتوقعة.

في نظام التبريد الغاز المبرد يلعب دورا هاما جدا لعمل دورة حرارية مميزة و يختلف باختلاف طبيعة السائل أو الغاز المستخدم.

بشكل عام النتائج التي حصلنا عليها ليست سوى بعض التفاصيل لفهم عملية صنع الجليد والتصميم الميكانيكي للآلة و توازن الطاقة و هذا بتقديم بعض المقترحات المتعلقة بمحطة تبريد لإنتاج الجليد.

## Abstract

The objective in this work is make a study on one of the averages that produce ice with a realization of a refrigerating machine that we have followed with a practical training in the period of realization.

The refrigeration machine is made according to a work plan previously studied from a technical and chronological point of view, and to begin our realization we have chosen all that is connected with the installation like necessary organs and special equipment to extinguish expected results.

In the refrigeration system the refrigerant plays a very important role for the functioning of the cycle and their thermodynamic characteristic varies according to the nature of the fluid used.

In general the results we have obtained are just a few details to get a good understanding of the refrigeration and mechanical study with an energy balance for we offer some proposals regarding the refrigeration plant for the production of ice.

<b>Tables des matières :</b>
------------------------------

*Remerciement*

*Liste des figures et tableaux*

*Nomenclature*

*Résumé*

*Introduction générale* **01**

*Chapitre 1: le génie climatique*

**Introduction** **04**

**1. Les filières du génie climatique** **04**

**2. Les Applications du génie climatique** **05**

**3. Le confort thermique** **07**

**4. Les facteurs influents** **07**

**Conclusion** **11**

*Chapitre 2: le froid et ses applications*

**Introduction** **12**

**1. La production de froid par compression de vapeur** **12**

**2. Le Coefficient de Performance** **17**

**3. Les fluides frigorigènes** **17**

**4. Nomenclature et désignation** **19**

**5. Les critères de choix d'un fluide** **21**

**6. Les domaines d'utilisation du froid** **23**

**7. Types de glace** **25**

**Conclusion** **26**

### ***Chapitre 3 : conception de la machine frigorifique***

<b>Introduction</b>	<b>27</b>
<b>1. Le groupe de production de froid</b>	<b>27</b>
<b>2. Dégivrage des évaporateurs</b>	<b>31</b>
<b>3. Les échangeurs thermiques en froid et climatisation</b>	<b>33</b>
<b>4. Les mécanismes de transfert</b>	<b>34</b>
<b>5. Les critères de performance d'un échangeur</b>	<b>35</b>
<b>Conclusion</b>	<b>38</b>

### ***Chapitre 4 : Réalisation et caractérisation de la machine frigorifique***

<b>Introduction</b>	<b>39</b>
<b>1. Choix et disposition des équipements</b>	<b>39</b>
<b>1.1.Le groupe frigorifique</b>	<b>40</b>
<b>1.2.Les évaporateurs de tests</b>	<b>43</b>
<b>1.3.La partie hydraulique</b>	<b>44</b>
<b>1.4.La partie électrique</b>	<b>45</b>
<b>2. Le choix du fluide frigorigène</b>	<b>46</b>
<b>3. Test de la machine frigorifique</b>	<b>46</b>
<b>4. La caractérisation de la machine frigorifique</b>	<b>48</b>
<b>Conclusion</b>	<b>54</b>
<b><i>Conclusion générale</i></b>	<b>55</b>



## Liste des tableaux :

<b>Tableau :</b>	<b>Pages</b>
<b>Chapitre 2</b>	
Tableau 2.1 : les types de pompes à chaleur associées à leurs sources	15
Tableau 2.2 : Caractéristiques du fluide	16
Tableau 2.3 : Historique des fluides utilisé en réfrigération	12-13
Tableau 2.4 : Valeurs de PAO de quelques fluides frigorigènes	22
Tableau 2.5 : Récapitulatif des ODP et GWP des gaz frigorigènes	22-23
<b>Chapitre 3</b>	
Tableau 3.1 : dimensions des tubes de la série frigorigène	31
Tableau 3.2 : vitesses recommandées de circulation de fluide frigorigène	32
Tableau 3.3 : Ordre de grandeur du coefficient global d'échange pour divers types d'échangeurs frigorigènes	37-38
<b>Chapitre 4</b>	
Tableau 4.1 : les paramètres du cycle frigorigène	49
Tableau 4.2 : calcule par Excel le coefficient global de transmission K	50

## Liste des figures :

<b>Figures</b>	<b>Pages</b>
<b>Chapitre 1</b>	
Figure 1.0 Changements d'états de la matière	08
Figure 1.1 – Changement d'état de l'eau	09
<b>Chapitre 2</b>	
Figure 2.1 : Schéma d'un cycle frigorifique simple	13
Figure 2.2 : Diagramme enthalpique	13
Figure 2.3 : Phénomène de l'effet de serre	21
<b>Chapitre 3</b>	
Figure 3.1 : schéma explicatif de la circulation de fluide dans l'installation frigorifique	29
Figure 3.2 : système de dégivrage	34
Figure 3.3 : Echangeur diphasique	30
Figure 3.4 : Echangeur monophasique	31
<b>Chapitre 4</b>	
Figure 4.1 : compresseur	40
Figure 4.2 : le condenseur en ventilation forcée	40
Figure 4.3 : détendeur capillaire	41
Figure 4.4 : Déshydrateur	41
Figure 4.5 : L'évaporateur utilisé	42
Figure 4.6 : Moule de notre évaporateur	42
Figure 4.7 : serpentins de l'évaporateur	43
Figure 4.8 : L'évaporateur assiette avec moule en cube de plastique	43
Figure 4.9 : évaporateurs à grille simple	44
Figure 4.10 : La pompe immergée 50 l/min	44
Figure 4.11 : Le réservoir d'eau	45

Figure .4.12 : Le régulateur de type Dixell	45
Figure 4.13 : L'emplacement des voyants	45
Figure 4.14 : L'électrovanne	46
Figure 4.15 : le poids de un cube de glace	47
Figure 4.16 : la quantité de glace obtenue	48
Figure 4.17 : les points des paramètres frigorifique dans le circuit	49
Figure 4.18 : représente le diagramme P-H du fluide R404	52
Figure 4.19 : représente le diagramme T-S du fluide R404a	53

## Chapitre 2

# Le froid et ses Applications

## Introduction

On peut considérer que l'histoire moderne des fluides frigorigènes est constituée de trois périodes : (i) du début de la figuration à 1930 ; (ii) entre 1930 et les années 80 ; (iii) des années 80 à nos jours. Au début de la réfrigération moderne (après 1830), il semblerait que les premiers choix effectués en termes de fluides frigorigènes étaient plus guidés par leur disponibilité que par leurs qualités. Les premiers fluides étaient des substances inorganiques : l'éther (Perkin en 1834), le chmogène en 1866 (mélange d'éther des pétrole et de naphta), le dioxyde de carbone en 1866, l'ammoniac en 1873, le dioxyde de soufre et l'éther de méthylène en 1875, le chlorure de méthylène (1878). Des mélanges d'acide sulfurique et d'hydrocarbures ont été utilisés en 1891, l'eau en 1912. Les hydrocarbures (propane et butane) ont été utilisés dans les années 1920. En raison de l'inflammabilité, toxicité et réactivité chimique de certains fluides, les accidents étaient courants. Dans les années 1930, avec la généralisation de la réfrigération, il devenait donc urgent d'utiliser une substance stable [12].

Par définition, la réfrigération est une façon d'abaisser la température d'un local, qu'il s'agisse d'un frigo ménager, d'un congélateur industriel, de la climatisation d'une maison, d'un immeuble ou d'une voiture, le système reste quasiment le même. Les températures et les pressions de fonctionnement sont différentes aussi bien dans les locaux que dans le circuit frigorifique.

Ils existent différentes façons d'obtenir du froid. Le principe réside en un transfert de calories. Pour ceci, la solution la plus répandue consiste à utiliser la compression/détente d'un fluide frigorifique. En effet le passage de l'état liquide à gazeux consomme des calories (ou produit des frigories) et les fluides frigorifiques ont des propriétés thermodynamiques qui nous permettent de créer artificiellement un cycle de condensation / détente [13].

### 1. La production de froid par compression de vapeur

Le fonctionnement de la machine à compression mécanique de vapeur est basé sur le cycle Carnot inverse, la compression du fluide frigorigène se réalisant par une voie mécanique, Un tel circuit se compose essentiellement de quatre éléments connectés par des conduites généralement en cuivre de diamètres différents. Durant un circuit frigorifique simple, le gaz réfrigérant doit suivre le chemin décrit à la figure 2.1.

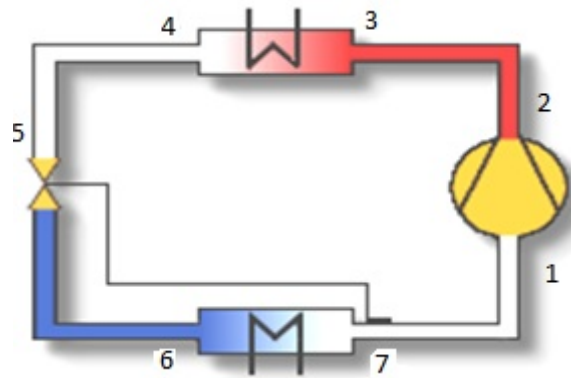


Figure 2.1 : Schéma d'un cycle frigorifique simple

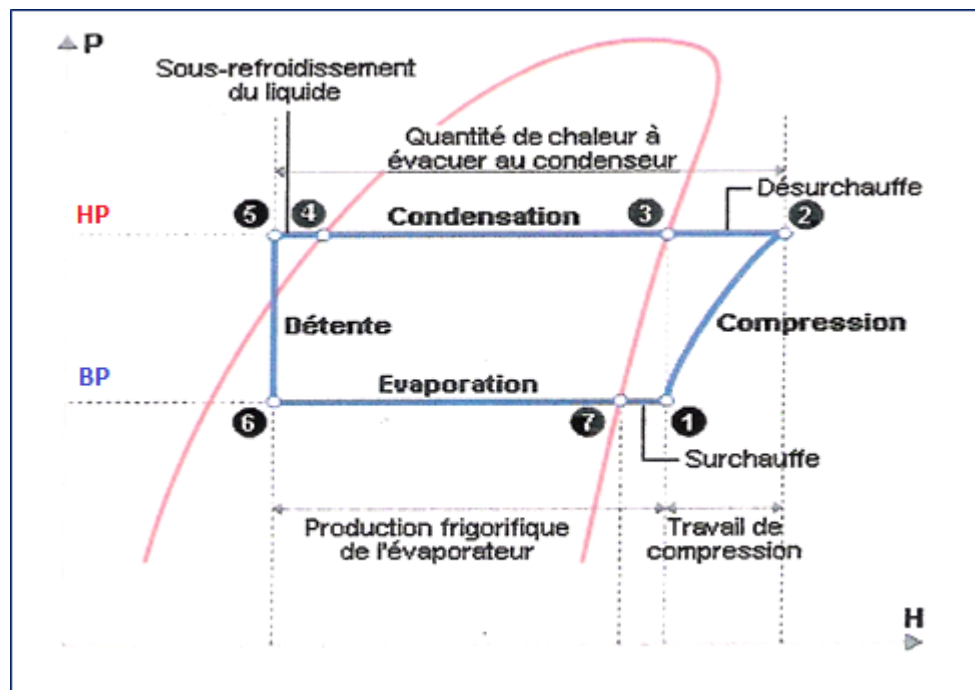


Fig.2.2 : Diagramme enthalpique

Voici un descriptif de chaque étape :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Contrairement à la surchauffe, il n'est pas toujours contrôlé car ne présente pas un danger direct pour les composants de l'installation.

Il a néanmoins une influence sur l'efficacité du cycle et doit être pris en compte.

- **Détente (5-6) :**

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

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

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

Elle est mise en 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.

Dans le cas de production de froid, on place l'évaporateur dans l'espace à refroidir. Dans le cas d'une pompe à chaleur utilisée pour faire du chaud, l'évaporateur sera placé dans le milieu fournissant les calories. Voici quelques exemples de milieux dans le tableau 2.1, pour les principaux types de pompe à chaleur :

Tableau 2.1 : les types de pompes à chaleur associées à leurs sources

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

- **Surchauffe (7-1)**

On provoque la surchauffe en sortie d'évaporateur pour s'assurer que tout le fluide soit passé à l'état gazeux. On évite ainsi les coups de liquide et on assure le bon fonctionnement de l'installation. Il faut également maintenir une surchauffe raisonnable afin de pouvoir convenablement 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 [13].

Voici dans le tableau 2.2, les différentes caractéristiques du fluide selon son emplacement dans le cycle :

Tableau 2.2 : Caractéristiques du fluide

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

## 2. Le Coefficient de Performance

Le Coefficient de Performance « COP » est le coefficient d'efficacité d'une installation produisant ou transférant de la chaleur. Au niveau du cycle frigorifique, il varie en fonction de l'écart de température (appelé " $\Delta t$ ") entre la source froide et la source chaude.

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

Plus précisément, une diminution de 1 K de la source froide va diminuer le COP de 1,8 %.

Une augmentation de 1 K de celle ci permettra en revanche d'augmenter le COP de 1,6%.

## 3. Les fluides frigorigènes

Thomas Midgley, de Frigidaire (Ohio, USA), se vit confier la tâche de chercher un fluide frigorigène présentant des caractéristiques thermo-physique appropriées, en insistant sur le caractère sécuritaire. Il est important de noter que Midgley et son équipe furent les premiers à mener une recherche systématique des fluides frigorifiques avec pour contrainte des propriétés thermodynamique adéquates tout en ayant pour objectif de minimiser les risques de réactive chimique, d'inflammabilité. Avec l'aide de ses collègues il isola des éléments de la table périodique de Mendeleïev dont certaines combinaisons formaient des molécules possédant des propriétés souhaitées. C'est ainsi qu'ils vont identifier et effectuer la synthèse du dichlorofluorométhane (CFC 12), qui devint le fluide frigorigène le plus courant.

Tableau 2.3 : Historique des fluides utilisé en réfrigération

Années	Réfrigèrent	Formule chimique
1830s	Caoutchoucine	Distillat de caoutchouc india
	Sulfurique	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{-O-CH}_2\text{CH}_3$
1840s	Éther méthylique(R-E170)	$\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$
1850	Eau /Acide sulfurique	$\text{H}_2\text{O /H}_2\text{OSO}_4$
1856	alcool éthylique	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$
1859	Ammoniac/Eau	
1866	Chémogène	Éther de pétrole et naphta
	gaz carbonique	$\text{CO}_2$
1860s	Ammoniac(R-717)	$\text{NH}_3$

	Méthylamine(R-630)	$\text{CH}_3(\text{NH}_2)$
	Éthylamine(R-631)	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-(NH}_2)$
<b>1870</b>	Formate de méthyle(R-611)	$\text{HCOOH}_3$
<b>1875</b>	le dioxyde de soufre(R-764)	$\text{SO}_2$
<b>1878</b>	Chlorure de méthyle(R-40)	$\text{CH}_3\text{CL}$
<b>1870s</b>	Chlorure d'éthyle(R-160)	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{CL}$
<b>1891</b>	Mélange d'acide sulfurique et d'hydrocarbures	$\text{H}_2\text{SO}_4, \text{C}_4\text{H}_{10}, \text{C}_5\text{H}_{12}, (\text{CH}_3)_2\text{CH-CH}_3$
<b>1900 s</b>	Bromure d'éthyle(R-160B1)	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{Br}$
<b>1912</b>	le tétrachlorure de carbone	$\text{CCl}_4$
	vapeur d'eau(R-718)	$\text{H}_2\text{O}$
<b>1920s</b>	Isobutane(R-600a)	$(\text{CH}_3)_2\text{CH-CH}_3$
	propane(R-290)	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{-CH}_3$
<b>1922</b>	Dielène(R-1130)	$\text{CHCL-CHCL}$
<b>1923</b>	l'essence	Hydrocarbures
<b>1925</b>	Triélène(R-1120)	$\text{CHCL=CCL}_2$
<b>1926</b>	le chlorure de méthylène(R-30)	$\text{CH}_2\text{Cl}_2$

Ces composées sont pour la plupart synthétisée a partir de molécules d'hydrocarbures saturés (méthane et éthane), auxquels on substituent des atomes de chlore et de fluor aux atomes d'hydrogène. Ils ont été dénommés "CFC" (chlorofluorocarbure). Lorsque la combinaison contient de l'hydrogène, le fluide est dénommé "HCFC" (hydro chlorofluorocarbure).

Le terme "HFC" (hydrofluorocarbure) est donné aux molécules constituées a partir de hydrocarbure et de fluore. Les CFC et les HCFC furent très vite adoptés comme de substance miraculeuses (propriétés adéquates, peu couteuse, ininflammables, stables, etc. ...) et également utilisées dans d'autres applications (solvant, agent de soufflage, fluide vecteurs dans les aérosols, etc. ).

Les HFC ont fait leur apparition très récemment, en vue du remplace des CFC et HCFC habituellement utilisés [13].

#### 4. Nomenclature et désignation

Les noms scientifiques des fluides frigorigènes sont relativement compliqués, donc d'emploi peu pratique. Par ailleurs, il est préférable de ne pas utiliser leur nom commerciale. En conséquence, il a été établi une désignation numérique liée à la composition du fluide. L'association américaine ASHRAE a ainsi adopté une désignation reconnue internationalement pour désigner les fluides frigorigènes.

Le fluide frigorigène se désigne par la lettre **R** (pour '*Refrigerant*' en anglais) complété par un numéro de code alphanumérique, de forme générale **Rxyz** suivi ou nom de lettres [14].

- **Les fluides purs**

Dans le cas où le numéro commencerait par 0 (non indiqué) ou 1, 2, 3, 4 la formule chimique du fluide est la suivante :

$$C_{(y+1)} H_{(Y-1)} F_{(z)} Cl_{(2x+5-y-z)} \quad (2.1)$$

En outre, pour les fluides à base de plusieurs atomes de carbone (éthane et plus), on peut trouver plusieurs combinaisons donnant la même formule chimique. Dans ce cas, on ajoute une ou deux lettres minuscules (a, b, ...) au terme  $R_{xyz}$ , pour désigner l'isomère en question. C'est par exemple le cas du *R134a* de formule chimique  $C_2H_2F_4$  qui s'écrit plus précisément  $CH_2FCF_3$ .

- **Les mélanges**

Lorsque le numéro du fluide commence par 4 ou 5, c'est un mélange azéotrope (4) ou azéotrope (5) le fluide pur, dont on ne peut pas définir la formule chimique à partir de la codification ASHRAE. On classe alors ces fluides en fonction de l'ordre chronologique dans lequel ils reçoivent une démonstration ASHRAE. On ajoute une lettre majuscule pour différencier les composés de même formule chimique, mais dont les proportions des composants diffèrent.

Exemple :

- Le R407A, le R407B et le R407C sont des mélanges azéotropiques de R32 R125 R134a dans des proportions différentes.

- Le 408A a reçu sa dénomination postérieurement à la série des R407.

- **Les autres fluides**

- a) si le numéro commence par 6, le fluide est un composé organique, codé de manière arbitraire.

Par exemple, le R600 est le butane et le R600a est l'isobutane (2-méthyle propane).

- b) Si le numéro commence par 7, le fluide est composé inorganique, codé de manière arbitraire, dont on ne peut plus déduire la formule chimique à partir de la dénomination ASHRAE.

Par exemple, le R717 est l'ammoniac(NH<sub>3</sub>), le R718 est l'eau (H<sub>2</sub>O) et le R764 est le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>).

- c) Dans le cas particulier où des atomes de brome (Br.) sont présents, la dénomination ASHRAE le signale par lettre B suivie du chiffre indiquant le nombre d'atomes de chlore remplacés par des atomes de brome. La codification aura alors pour forme :

**R<sub>XYZ</sub>B<sub>W</sub>**, correspondant à la formule chimique suivante :

$$C_{(C+1)} H_{(Y-1)} F_{(Z)} CL_{(2X+5-Z-W)} BR_{(W)} \quad (2.2)$$

Par exemple : le R114B2

- d) Dans le second cas particulier d'un composé cyclique, la notation est RCxyz, de formule chimique :

$$C_{(C+1)} H_{(Y-1)} F_{(Z)} CL_{(2X+3-Y-Z)} \quad (2.3)$$

Où « x » ne peut être que supérieure ou égale à 3, par exemples :

- RC317 d'où X=3 Y=1 et Z=7
- RC317 a donc pour formule chimique C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>CL.

## 5. Les critères de choix d'un fluide

- **Critères thermodynamiques:**

- Bonnes propriétés thermodynamiques en générale
- Puissance frigorifique volumétrique élevée
- Température critique élevée
- Point de congélation basse
- Taux de compression inférieur à 10 (pression condensation/pression évaporation)
- Pression adaptée aux matériels et aux conditions d'utilisations
- Miscibilité avec le lubrifiant
- Stabilité chimique et thermique

- **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**

Le GWP (ou PRG = Potentiel de Réchauffement global) est une indication sur la nocivité d'un gaz par rapport à l'effet de serre. La référence est le CO<sub>2</sub> avec un GWP=1, plus ce chiffre est élevé plus le fluide est nocif. Voici dans ce qui suit un tableau récapitulatif des GWP et ODP de différents gaz réfrigérant [14].

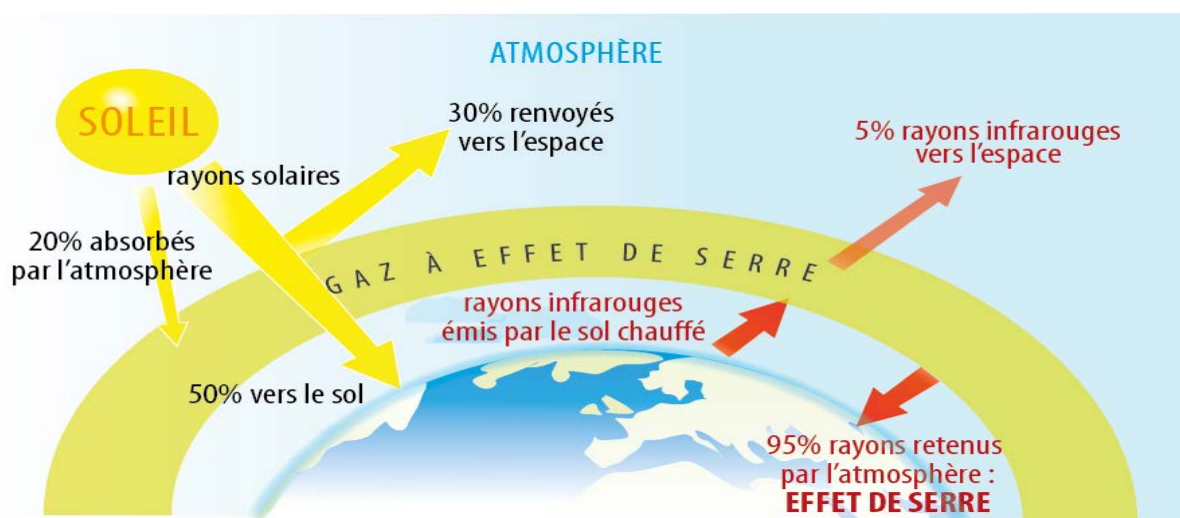


Figure 2.3 : Phénomène de l'effet de serre.

Il faut noter que les CFC ont une durée de vie importante dans l'atmosphère (un demi siècle en moyenne pour le R11, 102 ans en moyenne pour le R12, et 85 ans en moyenne pour le R113), par conséquent une fois ces produits rejetés, ils influenceront le processus d'appauvrissement de la couche d'ozone pendant maintes années à venir.

C'est pour caractériser la capacité de destruction de la couche d'ozone par les fluides frigorigènes qu'a été défini le Potentiel d'Action sur la couche d'Ozone (PAO) ou Ozone Déplétion Potentiel (PAO) avec comme valeur de référence le PAO du CFC R11 qui est de 1, ce fluide étant considéré comme celui ayant l'effet le plus destructeur sur la couche d'ozone.

Un PAO de 0 signifierait que le fluide frigorigène considéré n'a aucun effet sur la destruction de la couche d'ozone. Le tableau ci-dessous donne le PAO de quelques fluides frigorigènes.

Tableau 2.4 : Valeurs de PAO de quelques fluides frigorigènes.

FF	R11	R12	R22	R134a	R717	R507	R404A	R600
Famille	CFC	CFC	HCFC	HFC	Inorganique	Azéotropique	zéotropique	hydrocarbure
PAO	1	0.9	0.05	0	0	0	0	0

Les conséquences de la destruction de la couche d'ozone (augmentation des rayons UV B à la surface de la Terre) sont les suivantes :

- L'augmentation des cancers de la peau
- L'augmentation des cas de cataractes et autres lésions oculaires
- La diminution du système immunitaire
- La baisse des rendements agricoles et la destruction des forêts
- La détérioration de la vie maritime [15].

Tableau 2.5 : Récapitulatif des ODP et GWP des gaz frigorigifiques

	ODP (R 11)	GWP (kg éq. de CO2)		ODP (R 11)	GWP (kg éq. de CO2)
<b>CFC (interdits)</b>			Mélanges de HCFC		
<b>R-11</b>	1	4 000	R-404A	0	3 260
<b>R-12</b>	0,8	8 500	R-407C	0	1 530
<b>R-502</b>	0,2	5 490	R-410A	0	1 730

<b>HCFC</b>			Mélanges à base R-22		
<b>R-22</b>	0,04	1 700	R-408A	0,7	2 650
<b>HFC (corps purs)</b>			Autres		
<b>R-134a</b>	0	1 300	Propane / Butane	0	20
<b>R-125</b>	0	2 800	Ammoniac	0	<1
<b>R-143a</b>	0	3 800	CO2	0	1

## 6. Les domaines d'utilisation du froid

- **L'industrie agroalimentaire**

Est le secteur le plus concerné par l'utilisation du froid. Les fonctions qui y sont associées sont la conservation des propriétés organoleptiques et des qualités sanitaires des produits, le contrôle des processus de fermentation, en particulier pour le vin et la bière, la concentration de jus et la déshydratation de produits [16].

- **Les industries de transformation**

Concernées sont la plasturgie pour le contrôle de température des moules, l'industrie des caoutchoucs pour la valorisation des techniques de cryobroyage, les industries mécaniques pour les techniques de fretage, le durcissement des matériaux ou le traitement de surface. De façon plus générique, la déshumidification de l'air comprimé fait largement appel aux techniques du froid.



- **La production et la liquéfaction de gaz industriels**

La liquéfaction et la purification des gaz d'hydrocarbures constituent un enjeu économique majeur. Ces procédés intègrent, pour la plupart, des dispositifs de production de froid faisant appel à des cycles et des technologies de composants particulièrement complexes.

- **Le traitement des déchets**

Le traitement des déchets (gazeux, liquides, solides) fait aujourd'hui appel de plus en plus aux techniques frigorifiques et cryogéniques : ainsi la captation des vapeurs de COV (composés organiques volatils) repose fréquemment sur la condensation et l'adsorption à basse température, et la purification des effluents liquides peut être basée sur les techniques de congélation ou de cristallisation.

- **Les applications du froid en génie civil**

En génie civil se sont développées depuis de nombreuses années que ce soit pour la consolidation des sols lors de la réalisation d'ouvrage souterrain (tunnel, réseau métropolitain...) ou pour le refroidissement de grandes structures en béton.

- **Les domaines des loisirs**

ont également bénéficié des progrès des technologies du froid que ce soit dans le domaine bien connu des patinoires ou dans un domaine plus récent en rapide expansion qu'est la production de la neige artificielle.

## **7. La production de glace**

De façon classique, la glace est fabriquée par congélation de l'eau dans des moules immergés dans un bain de liquide incongelable à basse température. Cependant, il existe des procédés plus modernes permettant un encombrement moindre et un automatisme plus complet des opérations [16]. Les différentes techniques de congélation utilisées sont les suivantes:

- Par contact avec une surface refroidissante dans l'air (soufflage de l'air)
- Par immersion dans un bain de saumure.

### 7.1.Types de glace

On peut faire une classification des procédés de fabrication de la glace divisée selon la forme de la glace préparée.

#### ➤ Glace en cubes

Diverses machines fabriquent directement la glace en petits cubes ou cylindres destinés aux cafés, restaurants, hôtels etc. Le résultat est obtenu au moyen de surfaces refroidies à alvéoles présentant la forme désirée. La glace est particulièrement utilisée pour le glaçage des wagons dans des installations qui peuvent être rendues presque entièrement automatiques et qui se présentent sous la forme de tour de glaçage comprenant les générateurs de glace placés directement au-dessus des silos de stockage qui sont eux-mêmes situés assez plus haut pour permettre le déversement de la glace divisée dans les trappes des paniers de glace de wagons.

#### ➤ Glace en neige

La glace se forme à l'intérieur d'un cylindre (à axe horizontal ou vertical selon les cas) et est raclée au fur et à mesure de sa formation par des couteaux. Elle est évacuée sous forme de neige mélangée à une grande quantité d'eau dont elle est ensuite séparée par criblage. Cette neige peut être employée telle qu'elle (pour le poisson notamment), ou bien être pressée sous forme de boulettes ou briquettes.

#### ➤ Glace en tubes

La surface froide est constituée par une série de tubes verticaux. Le plus souvent l'eau descend en tourbillonnant à l'intérieur des tubes, tandis que le fluide frigorigène s'évapore dans une calandre à l'extérieur des tubes. La glace est décollée par le procédé des gaz chauds, descend par gravité, est découpée et se présente sous forme d'anneaux ou fragments d'anneaux.

➤ Glace en bande ou en ruban

Une couche continue de glace se forme sur une surface métallique refroidie et en mouvement, d'où elle est détachée par un racleur, un marteau ou par déformation de la surface. Cette surface est constituée dans la plupart des procédés relevant de cette catégorie, par un tambour cylindrique horizontal, refroidi par détente directe ou par saumure, plongé plus ou moins profondément dans un bain d'eau.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons eu l'occasion de présenter le froid comme un élément du génie climatique. Il peut trouver de nombreuses applications dans des domaines très variés tels que l'industrie agroalimentaires, la médecine, le confort thermique, la pétrochimie...). Encore, dans ce chapitre nous avons présenté les différentes étapes ainsi que les différents modes de la production de la glace. Une recherche pertinente sur les fluides frigorigènes été aussi abordé dans ce sujet.

# Chapitre 3

## Conception de la machine frigorifique

## Introduction

Du point de vue thermodynamique, une machine frigorifique est une machine à deux sources de chaleur et dont le fluide frigorigène décrit un cycle fermé dans le sens indirect (sens contraire à celui des aiguilles d'une montre). Un système de réfrigération commercial comprend quatre parties principales « évaporateur, compresseur, condenseur, détendeur ». De façon classique, la glace est fabriquée par congélation de l'eau dans des moules immergés dans un bain de liquide incongelable à basse température. Cependant, il existe des procédés plus modernes permettant un encombrement moindre et un automatisme plus complet des opérations [17].

### 1. Le groupe de production de froid

Le système de production frigorifique par compression mécanique est constitué par quatre éléments fondamentaux :

- **le compresseur**

Le compresseur dans une installation frigorifique est l'organe le plus compliqué et le plus délicat. Ses organes sont sans cesse en mouvement et ont pour rôle, d'augmenter la pression et de faire circuler le fluide, dans une installation frigorifique [18].

- **le condenseur**

Comme l'évaporateur, le condenseur est un échangeur thermique. Il permet la transformation des vapeurs surchauffées par le travail de compression en liquide sous-refroidi. Il est constitué d'un serpentин intimement lié à des ailettes pour favoriser l'échange, le tout refroidi par un ventilateur, de l'eau perdue, de l'eau d'une tour de refroidissement.

- **le détendeur**

Le détendeur permet d'alimenter correctement l'évaporateur en fluide frigorigène en optimisant son remplissage en fonction des apports externes. C'est lui qui assure le changement d'état du fluide, de l'état liquide à l'état gazeux en abaissant brusquement la pression à l'entrée de l'évaporateur. Le liquide arrive au détendeur en liquide sous-refroidi puis se détend au passage dans l'orifice du détendeur, la pression chute et le liquide se vaporise [19].

- **l'évaporateur**

Bien qu'il soit placé dans notre classification au quatrième rang, l'évaporateur est la source de production du froid, but final et principal de l'installation. Les évaporateurs sont des échangeurs thermiques au même titre que les condenseurs. Ils assurent le passage du flux calorifique du milieu à refroidir au fluide frigorigène, ce flux calorifique ayant pour effet de vaporiser le fluide frigorigène liquide contenu à l'intérieur de l'évaporateur.

Il est donc primordial que cet appareil possède un bon coefficient de transmission global  $K$  afin que le passage du flux calorifique du milieu extérieur au fluide frigorigène se passe, pour une surface donnée de l'appareil, avec une différence de température la plus faible possible entre la température du milieu extérieur à refroidir et la température de vaporisation du fluide frigorigène [20].

L'évaporateur est rempli d'un mélange hétérogène de liquide et de vapeur. Le titre de vapeur est fonction de la nature du fluide frigorigène, de la température d'arrivée du fluide au détendeur et de celle de vaporisation ; elle augmente constamment pour devenir égal à un à la sortie de l'évaporateur.

L'efficacité frigorifique du mélange liquide-vapeur étant celle correspondante à la partie liquide du mélange, il est de notre intérêt de réduire la valeur du titre du mélange admis à l'évaporateur à une valeur aussi faible que possible. C'est la fonction forte heureusement remplie par les séparateurs de liquide.

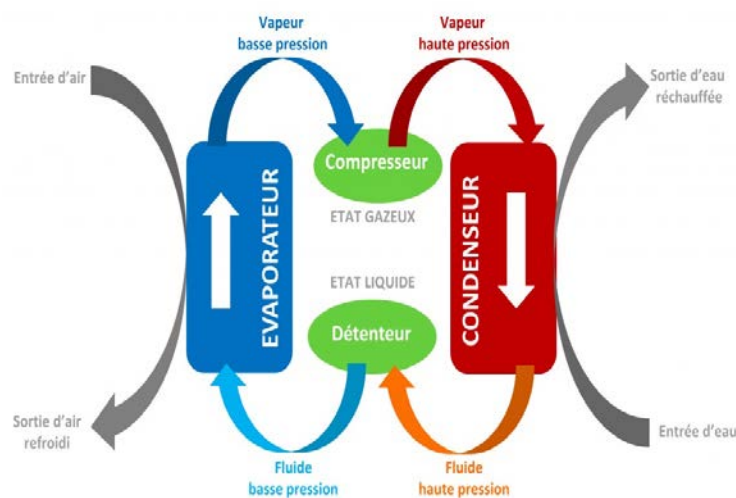


Figure 3.1- schéma explicatif de la circulation de fluide dans l'installation frigorifique

- **Tuyauteries**

L'étude du tracé et de dimensionnement des tuyauteries est primordiale pour le bon fonctionnement d'une installation frigorifique. Il faut que ce réseau de tuyauteries réponde aux conditions suivantes :

- Assurer une alimentation suffisante de l'évaporateur.
- Ne pas introduire de pertes de charge excessives.
- Permettre un retour d'huile correct au compresseur sans point bas où il peut se produire une accumulation d'huile.
- Être étanche pour maintenir une bonne propreté et une bonne siccité du système.

Généralement, dans les installations frigorifiques, le matériau utilisé pour les tuyauteries est spécifique dans la nature du fluide frigorigène. Ainsi, les tuyauteries des circuits à ammoniac sont en acier étier sans soudure. Pour les fluides chlorofluorés, les tuyauteries sont exclusivement en cuivre pour les petites installations dont les diamètres supérieurs à 30 mm. Les tubes de cuivre sont, à l'état recuit jusqu'à un diamètre de 3/4", au-dessous ils sont l'état écroui, les tubes destinés à l'industrie frigorifique, de qualité frigorifique, sont désoxydés, déshydratés, nettoyés intérieurement et extérieurement et livrés bouchés à leurs extrémités par des bouchons plastiques que l'on replace après chaque utilisation pour éviter le balayage par l'air humide et l'introduction de poussières, les dimensions des tubes sont données par leur diamètre extérieur (O.D).

Tableau 3.1 : dimensions des tubes de la série frigorifique

Diamètre nominal pouces OD	Diamètre réel en mm		Epaisseur du tube en mm	Matière	Poids en Kg/m
	Ext	Int			
<b>1/4</b>	6.35	4.35	1	Cuivre recuit en couronne                Cuivre écroui longueur droit	0.15
<b>3/8</b>	9.52	7.52	1		0.24
<b>1/2</b>	12.70	10.70	1		0.325
<b>5/8</b>	15.87	13.87	1		0.410
<b>3/4</b>	19.05	17.05	1		0.510
<b>7/8</b>	22.23	19.95	1.14		0.585
<b>1</b>	25.40	23.12	1.14		0.685
<b>1 1/8</b>	28.57	25.27	1.65		1.23
<b>1 3/8</b>	34.92	31.62	1.65		1.52
<b>1 5/8</b>	41.27	37.61	1.83		2
<b>2 1/8</b>	53.97	49.76	2.10		3
<b>2 5/8</b>	66.67	61.85	2.41		4.28
<b>3 1/8</b>	79.37	73.83	2.77		5.85

Les tuyauteries de liaison entre les différents éléments de l'installation forment trois réseaux :

- Les tuyauteries de refoulement : entre sortie du compresseur et entrée de condenseur.
- Les tuyauteries de liquide : entre sortie condenseur et entrée d'évaporateur.
- Les tuyauteries d'aspiration : entre sortie évaporateur et entrée du compresseur.

Pour dimensionner les tuyauteries, il faut tenir compte des pertes de charge dans les conditions de fonctionnement (température) et des conditions d'entraînement convenables de l'huile dans les tuyauteries d'aspiration et de refoulement (vitesse minimale). Par ailleurs, si les échangeurs sont placés au-dessus du compresseur, il faut veiller à ce que le liquide ne puisse pas se vidanger dans le compresseur à l'arrêt. Comme les pertes de charge varient avec le carré de la vitesse du fluide, il est nécessaire de limiter ces vitesses. La vitesse minimale pour l'entraînement de l'huile dépend des niveaux de température et des diamètres de tuyauteries. Le tableau suivant donne les vitesses couramment adoptées pour différents fluides frigorigènes [21].



Tableau 3.2 : vitesses recommandées de circulation de fluide frigorigène

Fluide	Vitesse du fluide (m/s)		
	Aspiration	Refoulement	Liquide
<b>Ammoniac</b>	5 à 25	10 à 15	0.50 à 2
<b>R22, R440a, R134a</b>	6 à 20	10 à 18	1 à 2
<b>Anhydride carbonique</b>	5 à 8	5 à 6	0.50 à 1.25

## 2. Dégivrage des évaporateurs

Lorsque la température superficielle de la section d'échange (tubes) des évaporateurs est inférieure ou égale à 0°C, il y'a formation de givre qui va entraîner une diminution importantes des échanges thermiques d'où la nécessité des opérations de dégivrage. Il existe plusieurs techniques de dégivrage : Dégivrage par circulation de l'air ambiant ; Dégivrage à l'eau ; Dégivrage à la saumure ; Dégivrage par résistances électriques ; Dégivrage par gaz chauds

- **Dégivrage par circulation d'air ambiant**

Cette technique consiste à arrêter le compresseur tout en gardant le (ou les) ventilateurs de l'évaporateur en fonctionnement (commande par thermostats d'ambiance), un thermostat d'évaporateur (ou un pressostat) permet de renseigner que la température superficielle de la section d'échange est remontée au dessus de 0°C et que la glace est fondue.

Cette technique n'est utilisable que lorsque la température de la chambre froide est supérieure à 4°C, son utilisation est limitée à cause du temps de dégivrage généralement long. Il est conseillé que pour des installations frigorifiques qui ne fonctionnent pas continuellement.

- **Dégivrage à l'eau**

Ce dégivrage consiste à pulvériser de l'eau qui va ruisseler sur l'évaporateur. Les dispositifs de pulvérisation et de répartition de l'eau doivent être conçus de façon que le ruissellement s'effectue uniformément sur l'ensemble de l'évaporateur et qu'il soit possible de vidanger l'installation de toute l'eau présente une fois le dégivrage terminé. Pendant l'opération tout le système frigorifique est à l'arrêt. C'est une technique rapide et le processus peut être accéléré en utilisant de l'eau chaude. Cependant les problèmes d'évacuation d'eau et les raisons hygiéniques et sanitaires limitent son utilisation.

- **Dégivrage à la saumure**

Le principe est identique au dégivrage à l'eau à la différence que l'eau est remplacée par de la saumure. Lorsque le point de congélation de cette saumure est suffisamment bas, la séquence de dégivrage peut s'effectuer en arrêtant simplement les ventilateurs de l'évaporateur sans qu'il ne soit nécessaire d'interrompre la circulation du FF d'où de moindres frais de régulation. Néanmoins, le coût de régénération de la saumure (la concentration diminue à chaque séquence de dégivrage) n'est pas négligeable, ce qui limite considérablement son utilisation.

- **Dégivrage par résistances électriques**

C'est la technique de dégivrage la plus utilisée pour les petites et moyennes puissances. Les résistances électriques sont placées au niveau de la section d'échange de l'évaporateur (les épingles chauffantes sont fixées parallèlement aux tubes généralement) et la mise en route de la séquence de dégivrage est généralement pilotée par une horloge et son arrêt commandé par un thermostat d'évaporateur (sonde placée entre les ailettes de l'évaporateur) ou lorsque le temps de dégivrage prévu est épuisé. La remise en route s'effectue normalement par le redémarrage du compresseur et seulement après quelques temps la remise en marche des ventilateurs de l'évaporateur pour éviter d'envoyer de l'humidité dans l'air ambiant. Les puissances calorifiques couramment utilisées sont de 1200 à 1800 W/m<sup>2</sup> de surface d'évaporateur.

Dans les chambres froides négatives (température inférieure ou égale à 0), les résistances électriques sont aussi utilisées pour le dégivrage de la glace dans : les bacs de rétention (bacs de condensats) les tuyaux d'évacuation des condensats (épingles chauffantes insérées dans la tuyauterie). Les puissances calorifiques couramment utilisées sont de 1200 à 1800 W/m<sup>2</sup> de bac et de 50 à 100 W/m de tuyauterie.

- **Dégivrage par gaz chauds**

Ce procédé de dégivrage par les gaz chauds (vapeurs chaudes de fluide frigorigène au refoulement) est utilisé généralement pour les installations industrielles de puissance importante. Il s'agit d'installation frigorifique comportant plusieurs évaporateurs que l'on peut dégivrer individuellement ou en groupe pendant que les autres fonctionnent. Afin d'avoir suffisamment de gaz chauds, il ne faut pas dégivrer simultanément plus de 1/4 à 1/3 de la surface d'évaporation d'une installation.

Le système de commande et de contrôle de ce type de dégivrage est quelque fois complexe et est généralement assuré par automate programmable.

Une installation comportant un seul évaporateur peut être également dégivré par des gaz chauds, la séquence de dégivrage est alors assurée au moyen d'une vanne d'inversion 4 voies ou robinet 4 voies d'inversion de cycle échangeant les rôles de l'évaporateur et du condenseur [22].

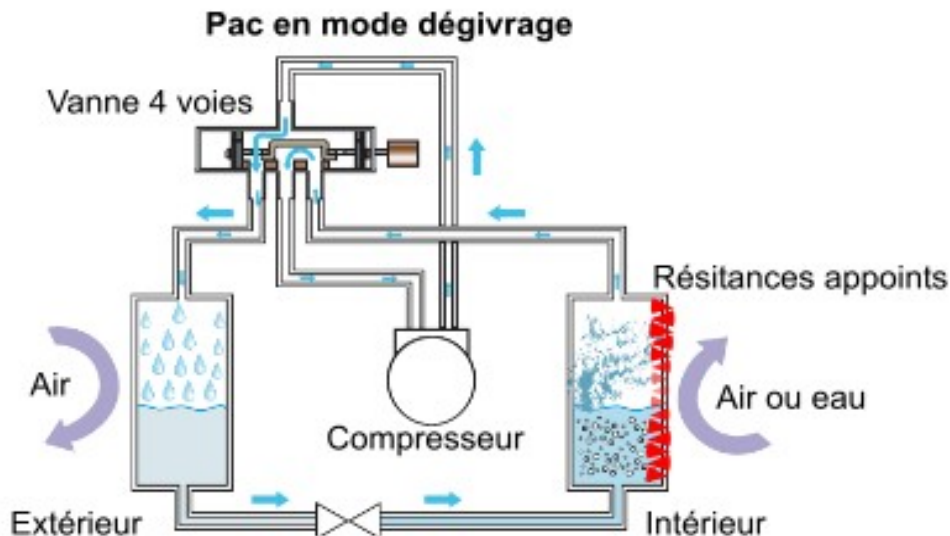


Figure 3.2- système de dégivrage

### 3. Les échangeurs thermiques en froid et climatisation

En froid comme en climatisation les échangeurs de quelque nature qu'il soit, font partie intégrante de nos installations. Citons les évaporateurs, les condenseurs, les tours de refroidissement, les systèmes de récupération d'énergie, etc.

Tout d'abord il faut préciser que dans ce passage de ce mémoire quand nous parlons de transfert thermique ou d'énergie thermique, nous nous ne parlons pas de température, mais plutôt de flux d'énergie thermique. Bien entendu, pour qu'il y ait transfert d'énergie entre deux éléments de même nature ou de nature différente, il faudra une différence de température, plus l'écart de température est important entre ces fluides (eau, air, etc.) plus l'énergie transférée sera importante.

De manière spontanée l'énergie s'écoule toujours du corps chaud vers le corps froid, ainsi deux corps qui ont la même température n'échangent donc pas d'énergie.

La fonction principale d'un échangeur est de permettre un transfert d'énergie entre deux ou plusieurs fluides à des températures différentes et ceci dans les meilleures conditions possible tout en réduisant les pertes, les fluides sont séparés par une surface de transfert généralement métallique.

#### 4. Les mécanismes de transfert

Les processus physiques des échangeurs de chaleur sont connus

- la conduction : transfert d'énergie dans un corps solide (paroi de l'échangeur) par agitation moléculaire
- la convection : transfert d'énergie dans un corps liquide ou gazeux par différence de température, dépend fortement du type de fluide utilisé.
- le rayonnement : échange d'énergie qui se fait sans contact dans le registre de l'infrarouge, exemple le rayonnement solaire.

Les modes de circulation sont importants, car ils conditionnent l'efficacité du transfert, les trois modes de circulation des échangeurs sont :

- Circulation à contre-courant : c'est-à-dire deux fluides circulant parallèlement en sens opposés, entrants et sortants par des extrémités opposées
- Circulation courant croisée : circulation perpendiculaire entre deux fluides.
- Circulation Co-courant : circulation parallèle et dans le même sens, les deux fluides sortent et entrent du même côté.

Il existerait d'autre part, des échanges diphasiques qui sont bien connus chez les frigoristes, puisqu'il signifie que ces échanges se font par changement d'état. La condensation (liquide, gaz) et l'évaporation (gaz, liquide) sont donc deux transferts d'énergie diphasique, voir figure 3.3.



Figure 3.3 : Echangeur diphasique (source ABC Clim)

## 5. Les critères de performance d'un échangeur

- La surface d'échange doit être aussi importante que possible.
- Les pertes de charge devront être réduites au maximum.
- L'efficacité d'un échangeur passe par un transfert d'énergie optimale et la distribution des flux doit être uniforme.

- **Le calcul des échangeurs**

Le calcul des échangeurs se fait sur la base d'un calcul de bilan thermique qui doit prendre en compte les pertes de charge, les débits masse de chaque fluide, les températures d'entrée et de sortie des fluides, des coefficients d'échanges thermiques des 2 fluides, etc.

Deux méthodes de calcul existent :

1. Méthode DTLM (Différence de Température Logarithmique Moyenne), basée sur 4 températures qui doivent être connues.
2. Méthode NUT (Nombre d'unité de transfert), méthode qui s'appuie sur la notion d'efficacité [23].

Formule simple de calcul du flux de chaleur échangé :

$$\dot{Q} = K \cdot S \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Avec :

$$K = \left( \frac{1}{R_{th}} \right) \quad (3.2)$$

K : est le coefficient de transmission thermique surfacique,

R<sub>th</sub> : La résistance thermique

S : la surface d'échange.

ΔT : représente l'écart de température moyen entre deux fluides.

Et l'autre équation s'écrit sous la forme :

$$NUT = \frac{h \cdot D_h}{\lambda} \quad (3.3)$$

h : convection d'échange.

D<sub>h</sub> : diamètre de l'échangeur.

λ : conductivité thermique.

On trouvera dans le tableau 3.3 l'ordre de grandeur des coefficients globaux d'échanges *h* dans divers types de condenseurs et d'évaporateurs [24].

Tableau 3.3 : Ordre de grandeur du coefficient global d'échange pour divers types d'échangeurs frigorifiques

Coefficient global d'échange <i>h</i> pour divers types de condenseurs (W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )			
Groupe	Medium de condensation	Type	<i>h</i>
A chaleur sensible	Air	Circulation naturelle	9 à 12
		Circulation forcée	24 à 30
	Eau	Immersion Double tube et contrecourant	240 à 300 700 à 950
Multitubulaires horizontaux		700 à 1000	

<b>Coefficient global d'échange pour divers types d'évaporateurs (<math>W m^{-2} K^{-1}</math>)</b>			
<b>Refroidisseurs de liquides</b>	A serpentin		70 à 95
	A immersion		400 à 580
	Double tube et contre-courant		580 à 820
<b>Refroidisseurs de gaz</b>	Plaques eutectiques (eau ou saumure)		35 à 95
	Circulation d'air forcée :		
	Tubes lisses		35 à 47
	Tubes ailettes		16 à 24
<b>A chaleur latente</b>	Evaporation forcée	Tubes lisses	240 à 350
		Tubes à ailettes	120 à 180

## Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les éléments fondamentaux d'une machine frigorifique qui va produire de la glace et l'importance de chaque organe dans cette installation. Ainsi le rôle des tuyauteries dans le raccordement entre ces différents éléments et leurs dimensions par rapport à la série frigorifique. Nous avons aussi éclairé le côté des vitesses recommandées de circulation de fluide frigorigène

En fin ce qui concerne le système de dégivrage nous avons présenté la différence entre ces opération technique et les procédés de chaque option.



## Chapitre 4

# Réalisation et caractérisation de la machine frigorifique

## Introduction

La réalisation de notre machine frigorifique été en partie majeure à l'établissement d'accueil EIMS Miliana, lieu de notre stage de fin d'étude.

La machine frigorifique est réalisée selon un plan de travail étudié auparavant d'un point de vue technique et chronologique. Une coordination avec plusieurs personnes du domaine été nécessaire voir même indispensable pour le bon choix des équipements et de leurs dispositions dans l'architecture générale de notre machine à glaçons.

La réalisation faisait l'objet de cinq principales étapes relative l'une à l'autre, il s'agit de :

- Réalisation d'un socle en tube carré de cote égale à 6 cm, c'est le corps robuste de la machine ou vont s'installer tout les équipements à venir.
- Installation du groupe frigorifique (compresseur, condenseur et détendeur) ;
- Installation de l'évaporateur spécifique à la production de glace avec une inclinaison de 30 ° ;
- Installation du système hydraulique (bac d'eau + pompe immergée) ;
- Installation du tableau de commande (raccordements électriques, régulation et commande).

### 1. Choix et disposition des équipements

Notre machine est donc réalisée en 5 étapes comme déjà décrit, elle est cependant composée de trois sous-systèmes :

- Le groupe frigorifique y compris l'évaporateur spécifique à la production de glace.
- La partie hydraulique qui assure le remplissage des moules de glaçon par pulvérisation.
- La partie électrique y compris le système de régulation.

Dans le passage suivant, nous allons décrire et présenter tout les équipements utilisés pour la réalisation de cette machine. Ils seront répartis chacun dans son sous-système.

### 1.1. Le groupe frigorifique

Pour notre machine, et selon notre besoin en puissance frigorifique, nous avons choisis les équipements suivants :

- **Compresseur**

Les caractéristiques de notre compresseur sont :

Référence : A E Z 3 4 3 0 Z

Puissance : 741W

Voltage : 220V

Gaz : R404a

Refoulement : 4,76 (3/16")



Aspiration : 6.35 (1/4")

Figure 4.1 : compresseur 1/4

- **Le Condenseur**

Le condenseur a air en ventilation forcée se constitue de faisceaux de tubes à ailettes (24 tubes placés sur 3 rangés ; Surface : 575 cm<sup>2</sup>). Son efficacité dépend de la vitesse de circulation de l'air et des tubes à ailettes. Notre condenseur est placé en face du compresseur.



Figure 4.2 : le condenseur en ventilation forcée

- **Le détendeur capillaire**

La détente obtenue par pertes de pression lors du passage du fluide dans un tube de cuivre de faible diamètre intérieur 0.6 mm à 1 mm et longueur convenable qui relie condenseur et évaporateur. Ce mode de détente est utilisé pour les installations de faibles et moyennes puissances dont le point de fonctionnement ne sera pas très loin de celui des réfrigérateurs et congélateurs domestiques. A l'arrêt du compresseur il se produit une égalisation entre la haute

et la basse pression ce qui permet un démarrage ultérieur du compresseur plus facile puisque le couple de démarrage faible.



Figure 4.3 : détendeur capillaire

- **Déshydrateur**

Le Déshydrateur est un petit cylindre en cuivre qui permet de séparer les gouttelettes du gaz réfrigérant (404A) et donc de conserver notre circuit. Il sera placé à la sortie du condenseur et l'emplacement du déshydrateur a la sortie de condenseur et l'entrée du détendeur capillaire.



Figure 4.4 : Déshydrateur

- **Evaporateur**

L'évaporateur constitue avec le compresseur la partie essentielle de l'installation. C'est l'échangeur thermique qui permet la transmission du froid du fluide frigorigène vers l'eau qui sera glacée à travers le serpentin et la plaque en inox sous forme de moule. En effet, la quantité d'eau relativement chaude ( $T = 15^{\circ}\text{C}$ ), déposée sur l'assiette en inox contribuera à l'évaporation du fluide frigorigène ( $T = -23^{\circ}\text{C}$ ). Le mode de transfert de chaleur par conduction thermique règne sur ce phénomène. Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 schématisent la disposition du moule en inox avec le serpentin en cuivre. En effet, un moule est touché par trois tubes de cuivre de diamètre ( $\frac{1}{4}$  de pouce).

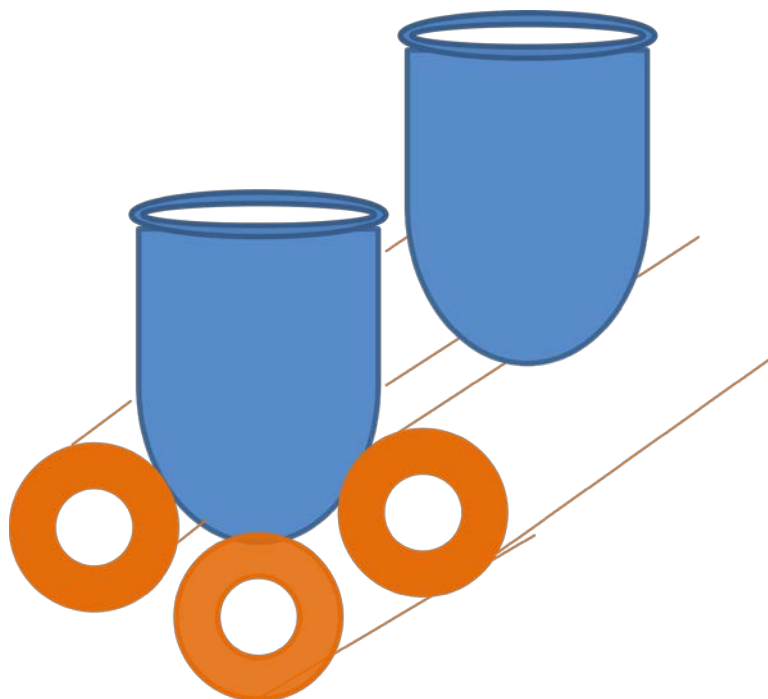


Figure 4.5 : L'évaporateur utilisé



Figure 4.6 : Moule de notre évaporateur





Figure 4.7 : serpentín de l'évaporateur

### 1.2. Les évaporateurs de tests

Il est à signaler que dans notre réalisation de cette machine nous avons essayé plusieurs types d'évaporateurs pour arriver au bon résultat. Nous avons pu constater que chaque modèle et chaque conception possède des lacunes technologiques. Plusieurs postulats ont été notés et rédigés. Cette étape nous a bien servi pour arriver à la disposition finale de l'évaporateur idéal. Dans ce qui suit, nous présentons quelques types d'évaporateurs que nous avons testés.

- **Évaporateur assiette avec moule en plastique et couvercle**

Après l'essayage de cet évaporateur, (présenté en figure 4.8), nous avons trouvé que l'échange thermique entre la tôle inox du moule et le serpentín n'est pas parfait et par conséquent, le temps sera très long pour avoir les premiers morceaux de glaçons. Après le lancement du mode dégivrage, les cubes ne seront pas libérés.

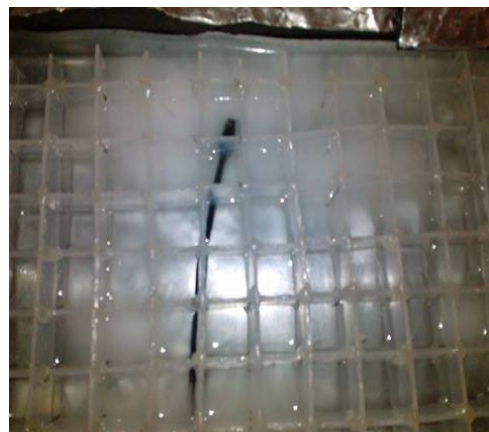
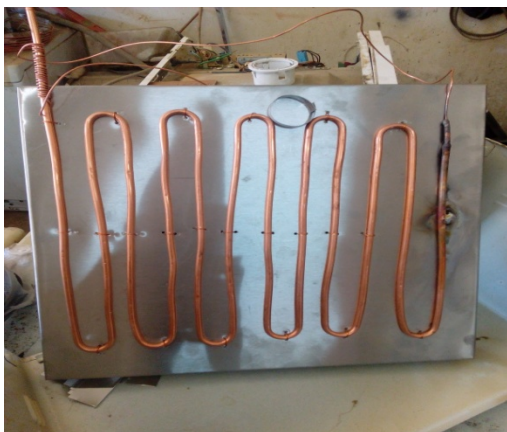


Figure 4.8 : L'évaporateur assiette avec moule en cube de plastique

- **Évaporateur à grille simple sans couvercle**

Dans ce cas nous avons fixé le moule directement sur le serpentin de cuivre avec une moyenne de température de 2 °C. Malheureusement, nous nous sommes toujours pas arrivé à un résultat pour la congélation de l'eau et nous avons remarqué que la surface d'échange est très petite.



Figure 4.9 : évaporateurs à grille simple

### 1.3.La partie hydraulique

Dans le système hydraulique on trouve le principe de pulvérisation de l'eau. En effet, des injecteurs sont installés sur un tube collecteur. Ce dernier est alimenté par une pompe immergée spécialement conçue à notre réalisation.

- **Pompe (FIZZONASCO ITALY)**

Il s'agit d'une pompe dont les caractéristiques sont les suivantes :

Model: MH 50 F (50 liters / minutes)

Tension: 220V /240V

Fréquence : 50 Hz

Ampérage : 0.7 A

Puissance : 22 W



Figure 4.10 : La pompe immergée 50 l/min

Un réservoir d'eau est placé sous l'évaporateur, il va alimenter en permanence la pompe immergée. Voir figure 4.11.

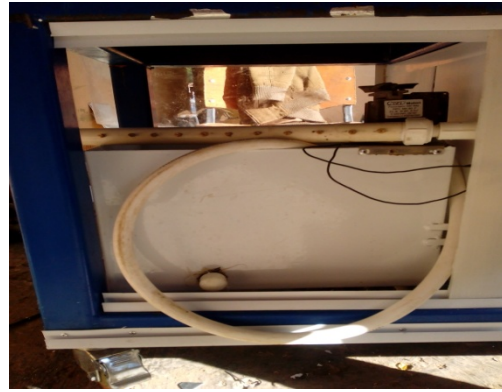


Figure 4.11 : Le réservoir d'eau

#### 1.4.La partie électrique

Dans cette partie, tous les raccordements électriques et les liaisons de régulation sont présentés.

- **Le Régulateur Dixell**

Ce type de Régulateur propose une gamme complète de régulations électroniques pour la réfrigération industrielle et commerciale. Dans notre cas ce régulateur est sensé donner une information sur la température désirée, la température de consigne, le nombre de dégivrage par jour et le mode dégivrage manuel.



Figure 4.12 : Le régulateur de type Dixell

- **Les voyants**

Dans notre installation on trouve trois voyants de régulation : (i) Voyant d'alimentation avec une couleur vert qui détermine l'existence de l'électricité. (ii) Voyant de l'installation frigorifique qui informe le démarrage de circuit. (iii) Voyant de dégivrage qui indique le lancement de système de dégivrage.



Figure 4.13 : L'emplacement des voyants



- **L'électrovanne :**

Cet organe est placé entre le compresseur et le condenseur afin d'acheminer les gaz chaud vers l'évaporateur en mode dégivrage seulement, si non il est fermé en mode normal dit de « refroidissement ».



Figure 4.14 : L'électrovanne

## 2. Le choix du fluide frigorigène

- **Le R404a (R143a : 52 % + R125 : 44 % + R134a : 4 %)**

Le R404A présente des caractéristiques communes avec le R410A (il se comporte aussi comme un fluide quasi-azéotropique) mais sa pression de fonctionnement est plus basse. Sa particularité est de ne pas beaucoup s'échauffer pendant la compression. La température des vapeurs surchauffées en sortie de compresseur reste donc modérée, ce qui convient parfaitement à la mise en œuvre domestique comme pour notre application.

Le R404a est un gaz qui est loin d'être donné, environ 2 fois plus cher que le R134a et 3 fois plus cher que le R22. De plus un compresseur au R404a est bien plus cher (prix neuf) qu'un compresseur au R134a.

## 3. Test de la machine frigorifique

- **Avant le test**

Pour lancer les tests de notre machine il a fallu s'assurer qu'il n'y a pas des fuites le long de notre chemin fluide. Il faut aussi s'assurer que tous les organes du circuit frigorifique sont en état de marche. Une dernière vérification du branchement électrique nous à très utile pour se rassurer du point de vue alimentation électrique. Un afficheur de température indique à l'heure du démarrage du test une valeur de 25°C.

- Température d'air 25 °C
- Température d'eau 15 °C
- Température d'évaporateur avant injection d'eau -5 °C

Après le démarrage nous avons remarqué que le Dixell affiche les différentes températures qui varient à chaque instant. Après un certain temps la température diminue jusqu'à  $-10$ .

Après la fin du processus de congélation nous avons pris note des variantes suivantes :

- La durée de congélation
- Le poids de un cube de glace
- Le volume de un cube de glace
- La température de un cube de glace
- La durée de fusion de la glace
- La quantité de glace qui est cédée par l'évaporateur

- **Les résultats expérimentaux**

Après la fin de l'opération de production de la glace nous avons pu obtenir des résultats satisfaisants.

- La durée de la congélation à compter du démarrage de circuit se situe entre 20 et 25 minutes pour la première mise en marche. Cette durée a diminué de 5 minutes lors de notre deuxième démarrage juste après le mode dégivrage.
- Le poids d'un cube de glace après la mesure il est entre 13 à 14.5 g



Figure 4.15 : le poids de un cube de glace

- Le volume de un cube de glace est environ  $14.71 \text{ cm}^3$ .
- La température de un cube de glace, est entre  $(-4)$  et  $(-5)$ , avec une température ambiante de  $25$  à  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  la température va diminuer jusqu'à  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , et la durée de fusion de cubes de glace estimée à environ 2 heures pour le changement d'état du solide vers le liquide à l'air libre.

- La quantité de la glace cédée par l'évaporateur elle est de 720 g, pour 48 cube de glace de 15 g a chaque cube la masse égale 0.72 kg.



Figure 4.16 : la quantité de glace obtenue

#### 4. La caractérisation de la machine frigorifique

La production de glace est le but recherché dans cette réalisation dans ce cas notre machine est frigorifique est considérée comme un banc d'essai et non pas une machine qui sera commercialisée, en voici les caractéristiques exactes :

- **Caractéristiques géométriques**

Les dimensions de notre machine frigorifique

La longueur : 85 cm

Largeur : 53 cm

La hauteur : 95 cm

Le poids (sans la charge de l'eau) : environ 35 kg

- **Caractéristiques thermodynamiques**

Ces caractéristiques sont liées au fonctionnement de la machine pour la détermination des points de fonctionnement avant et après chaque organe de notre circuit.

En introduisant les valeurs exactes de puissance du compresseur et du fluide frigorifique dans le logiciel solkan, nous avons pu obtenir les résultats présentés au tableau 4.1.

Tableau 4.1 : les paramètres du cycle frigorifique

Point	p bar	t °C	v dm <sup>3</sup> /kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	x --
1	4,31	-3,00	47,54	367,18	1,6371	
2s	16,05	46,93	12,79	394,46	1,6371	
2	16,05	52,60	13,36	401,27	1,6582	
3	16,05	52,60	13,36	401,27	1,6582	
3'	16,05	35,00	11,43	379,22	1,5886	
3"4"m	16,05	34,82	6,22	315,14	1,3803	
4'	16,05	34,64	1,01	251,05	1,1720	
4	16,05	34,64	1,01	251,05	1,1720	
5	4,31	-10,35	17,60	251,05	1,1961	0,374
56"m	4,31	-10,18	31,62	305,87	1,4044	
6"	4,31	-10,00	45,65	360,69	1,6127	
6	4,31	-3,00	47,54	367,18	1,6371	

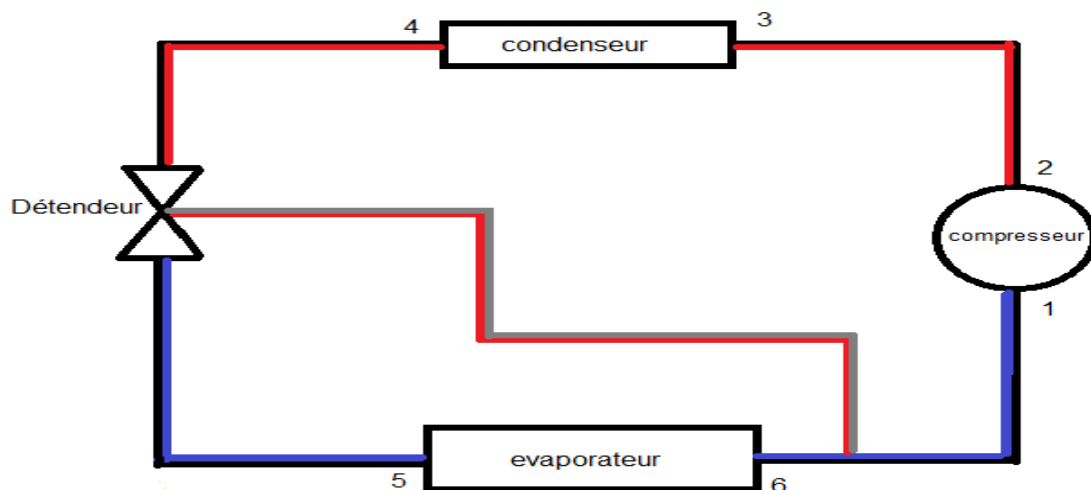


Figure 4.17 : les points des paramètres frigorifique dans le circuit.

A partir de ce tableau, on trouve que la pression d'évaporation est égale à 4.31 bar et la pression de condensation égale 16.05 bar et la température moyenne d'évaporateur elle est de -10.18 °C.

La quantité de froid à produire (ou de chaleur à absorber) par l'évaporateur dépend des conditions particulières de l'installation et est évaluée par l'établissement du "bilan thermique" de celui-ci. Elle est conventionnellement désignée par le calcul de la puissance de l'évaporateur qui désignée par :

$$\dot{Q}_{\text{évap}} = K \cdot S \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

Et :

$$K = \frac{1}{\Sigma R_{th}} = \frac{1}{\left( \frac{1}{2 \cdot \frac{\ln \frac{D_2}{D_1}}{2\pi\lambda_{\text{cuivre}} \cdot l} + \frac{2e_{\text{acier}}}{\lambda_{\text{acier}} \cdot S_{\text{cube}}} + \frac{e_{\text{eau}}}{\lambda_{\text{eau}} \cdot S_{\text{cube}}}} \right) + \frac{\ln \frac{D_2}{D_1}}{2\pi\lambda_{\text{cuivre}} \cdot l}} \quad (4.2)$$

Nous allons considérer la différence de température moyenne entre la température de l'évaporateur et la température d'eau. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$\Delta T_{\text{moy}} = (T_{\text{eau}} - T_{\text{évap}}) \quad (4.3)$$

Le coefficient global de transmission « K » est de forme identique à celui établi pour les condenseurs. Ce coefficient « K » nous indiquera la quantité de « kcal » que peut absorber un évaporateur par mètre carré de surface, par heure et par degré d'écart entre la température du fluide en ébullition et la température du médium à refroidir. Il varie avec le type de l'évaporateur et sera une des grandeurs caractéristiques qui vont permettre le calcul la surface à donner à un évaporateur déterminé pour évacuer la production désirée.

Dans notre cas, le coefficient sera à calculer théoriquement puis déterminer expérimentalement en vue d'une comparaison par la suite.

Nous avons calculez le coefficient « K » à l'aide d'Excel en utilisant l'équation (4.1) ; le tableau résume les calculs.

Tableau 4.2 : calcule par Excel le coefficient global de transmission K

D1	D2	E eau	E acier	λ cuivre	λ acier	λ eau	L cuivre
7.52 mm	9.52 mm	0.04 m	0.003m	380 w/m.k	46W/m.K	0.6 W/m.K	5.4m
S	R finale	K		T evp	Teau	Q evp	
12.56 cm <sup>2</sup>	0.05 m <sup>2</sup> /K.W	20.10 W/m <sup>2</sup> .K		-5 °C	20 °C	<b>400 W</b>	

La différence de température entre la température moyenne du milieu, à refroidir et la température de vaporisation du fluide frigorigène.  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$

Si c'est la surface de transmission de l'évaporateur est en vas calculer la surface de un cube et multiplie par 48 cubes car la surface d'échange contiens 48 cubes dans le moule d'évaporateur

$$S = (3.14 \cdot 16) / 4 = 12.56 \text{ cm}^2/\text{cube}$$

$$S = 12.56 \cdot 48 = 602.88 \text{ cm}^2$$

$$\text{Donc: } Q_v = 20.10 \cdot 20 = 400 \text{ W}$$

Le débit massique du fluide frigorigène demeure :

$$\dot{m} = \frac{Q_{evp}}{(h_6 - h_5)}$$

$$\dot{m} = 0.003 \text{ kg} / \text{h}$$

Le débit volumique du cycle :

$$\dot{V} = \dot{m} \cdot v_c = 0.003 \cdot 6.22 = 0.02 \text{ m}^3 / \text{h}$$

La différence de pression :

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 16.05 - 4.31 = 11.74 \text{ bar}$$

Le COP mesure le rendement de la machine frigorifique dans les conditions expérimentales données :

$$\text{COP} = \frac{\text{variation d'enthalpie au cours de la condensation}}{\text{variation d'enthalpie au cours de évaporation}}$$

Au bien :

$$\text{COP}_{\text{théorique}} = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_1}$$

$$COP_{théorique} = \frac{367.18 - 251.05}{401.27 - 367.18} = 3.4$$

Pour calculer le rendement théorique de la machine il faut de calculer le coefficient d'échange globale du Carnot :

$$COP_{carnot} = \frac{T_{evp}}{T_{con} - T_{evp}}$$

$$= \frac{(-10 + 273.15)}{(35 + 273.15) - (-20 + 273.15)} = 4.78$$

Donc :

$$\eta_{théorique} = \frac{COP_{théorique}}{COP_{carnot}}$$

$$= \frac{3.4}{4.78} = 0.71$$

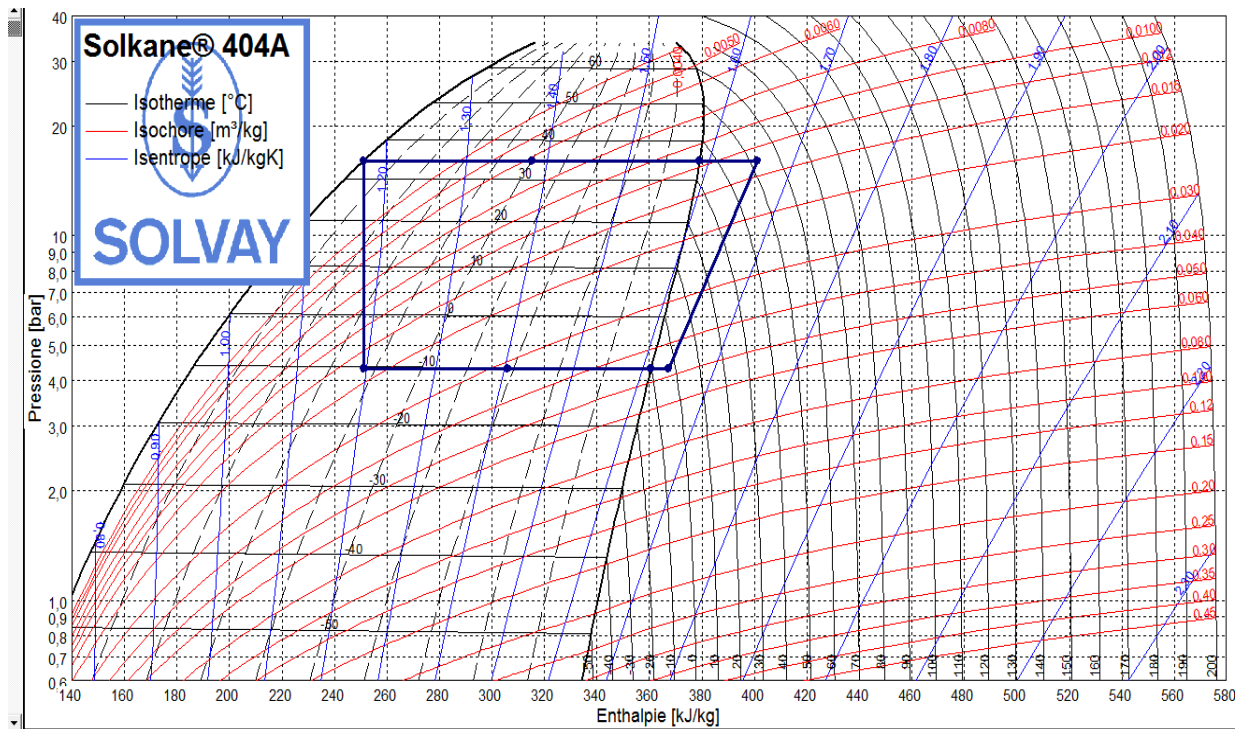


Figure 4.18 : représente le diagramme P-H du fluide R404a

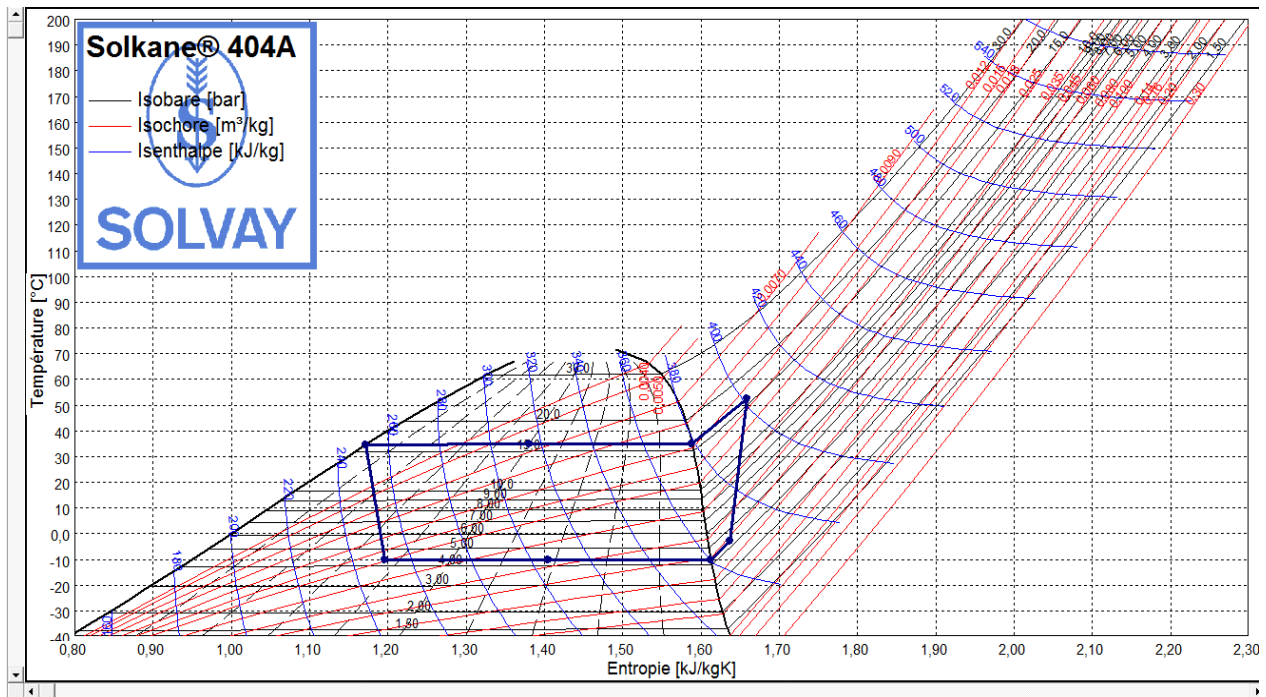


Figure 4.19 : représente le diagramme T-S du fluide R404a

L'ensemble de la consommation de notre machine s'élève à 800 W (Compresseur + ventilateur du condenseur).

La production horaire de glace est d'environ 2 kg, ce qui va donner une consommation énergétique de 400 Wh/kg. En sachant que le prix du kWh est 1.77 DA on sera largement en bénéfice si même notre investissement s'élève à 100000 DA.

Un temps de retour sur investissement de 1 an est donnée comme optimal si le prix de vente de notre glace produite est de 17 DA avec une durée de fonctionnement de 8 heure seulement.



**Conclusion**

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté chaque élément de notre machine, son emplacement et son rôle. Une caractérisation de cette machine ainsi que celle de la glace est aussi présentée en détail. En fin de ce chapitre nous pouvons dire que notre réalisation est un bon début pour une future étape, visant l'industrie pour une éventuelle étude professionnelle de ce type de machine frigorifique rarement étudié de nos jours.

## *Nomenclatures et symboles :*

**C** : consommation énergétique.

**M** : la masse en kilogramme. [kg]

**$\eta$**  : rendement théorique.

**COP théorique** : coefficient de performance théorique.

**COP Carnot** : coefficient de performance de Carnot.

**$\Delta P$**  : différence de pression. [pa]

**$\tilde{V}$**  : débit volumique. [m<sup>3</sup>/s]

**$\dot{m}$**  : débit massique. [kg/s]

**S** : surface de transmission. [m<sup>2</sup>]

**$\Delta T$**  : différence de température. [K]

**Qv** : puissance frigorifique de l'évaporateur[w]

**K** : coefficient d'échange. [w/m<sup>2</sup>k]

**$\lambda$**  : conductivités thermiques. [w/m k]

**e** : épaisseurs du matières. [m]

**Te** : température de l'évaporateur. [C°]

**Teau** : température de l'eau. [C°]

**D1**: Diamètre intérieure. [m]

**D2** : Diamètre extérieure. [m]

**L** : la longueur de serpentin. [m]

**W** : watt.

**A** : ampère.

**V** : volte.

**K** : kelvin.

**P** : pression.

**T** : température.

**V** : volume massique.

**h** : enthalpie.

**S** : entropie.

**X** : titre

**NUT** : Nombre d'unité de transfert

**PRG** : Potentiel de Réchauffement global

**PAO** : Ozone Déplétion Potentiel

**GWP** : Global Warming Potential

## **Références bibliographiques :**

- [1] Michel Feidt, Génie énergétique : du dimensionnement des composants au pilotage des systèmes, Dunod, Paris, 2014. ISBN 978-2-10-070545-0.
- [2] [www.Xpair.com](http://www.Xpair.com)
- [3] MARVILLET Christophe
- [4] <http://www.codeart.org>
- [5] <https://chauffage.ooreka.fr/astuce/voir/608651/genie-climatique>
- [6] broschuere\_chemie-pharma\_2015.
- [7] <http://www.gason.com>
- [8] <http://www.gason.com>
- [9] <http://www.xpair.com>
- [10] Cours.etsmtl
- [11] Technique du froid/ cours de base / Edition : juillet 2007
- [12] <http://www.herve-thermique.com>
- [13] L'après R22
- [14] [www.energieplus-lesite.be](http://www.energieplus-lesite.be)
- [15] 3ème Partie la Production de Glace/ Avril 2013.
- [16] Technique d'ingénieur.
- [17] UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP / ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES / PFE : conception d'une petite unité de fabrication de glace en écaille de haute qualité / DATE : Juillet 1993
- [18] /dossiers--fiches-techniques3
- [19] /ABC clim
- [20] UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP / ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES / PFE : conception d'une petite unité de fabrication de glace en écaille de haute qualité / DATE : Juillet 1993.
- [21] Froid industriel/ *Monique Lallemand et Philippe haberschill.*

[22] TECHNIQUE DU FROID / COURS DE BASE / *CFmnLog* / Edition : juillet07 / Série : YSH04054.

[23] <http://www.abcclim.net/transfert-thermiques-echangeurs.html>.

[24] Yves JANNOT : 2ème année/ Département EPT 2016.