

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET

DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de la Construction

Département Génie Mécanique

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'Obtention du Diplôme de Master Professionnel en
Energétique.*

OPTION : Chauffage, Climatisation et Ventilation

*Réalisation d'un prototype de machine
frigorifique fonctionnant à 12volt
produits par l'énergie solaire
photovoltaïque*

 *PRMOTEUR:*
MR: Ferrouk

Réalisé par :

 *Mr Ait Mammar zouhir*

Année Universitaire : 2013/2014

Remerciements

Au terme de ce travail, je voudrai adresser mes vifs remerciements à tous mes enseignants de Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, notamment à mon encadreur monsieur Ferrouk en lui exprimant ma profonde gratitude d'avoir dirigé ce travail.

Le travail présenté dans ce mémoire, a été effectué à l'atelier de fabrication et réparation des équipements industriels de l'entreprise Ait Mammar, à Tizi-Ouzou, et Je remercie profondément le chef de laboratoire "Laboratoire d'Application des Techniques Avancées de génie électrique" « LATAGE » de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour leurs disponibilités et pour leurs conseils et encouragements.

Je présente mes remerciements à monsieur le président et les membres du jury pour l'honneur d'avoir assisté à ma soutenance et juger ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à l'ensemble du personnel du département de Génie Mécanique, et aux enseignants qui ont assuré notre formation de master professionnel.

Je remercie mes amis de ce master, avec lesquels j'ai passé des moments inoubliables au cours de l'année théorique et pendant la réalisation de ce travail, ils m'ont manifesté leur soutien et m'ont toujours encouragé de continuer.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents pour leur sacrifices, et que n'ont
jamais cessé de m'encourager*

Que le dieu les protège

Mon très cher frère Walid

Et ma très chère sœur Lyla

Ma grand-mère que le dieu me la garde

A

Mon cousin Sadek et ma futur femme Olya

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique	
I.1 Introduction	3
I.2 Généralités	3
I.2.1 Mode de production du froid et applications	3
I.2.2.2 La réfrigération	4
I.2.3 Quelques grandeurs physiques.....	4
I.2.3.1 La température	4
I.2.3.2 La chaleur	5
I.2.3.3 La puissance	6
I.2.3.4 La pression	6
I.2.3.5 Le changement d'état	6
I.2.3.6 La vaporisation.....	7
I.2.3.7 La condensation	7
I.2.4 Les fluides frigorigènes	8
I.2.5 Organes principaux d'une machine frigorifique	9
I.3 Principe de production du froid	9
I.4 Transitions de phase :	10
I.4.1 Diagramme (P –T)	10
I.4.2 Equilibre entre deux phases	11
I.4.3 Construction de Maxwell	12
I.4.4 Vaporisation d'un liquide et liquéfaction d'un gaz	13
I.4.4.1 Température d'ébullition	13
I.4.4.2 Pression de vapeur saturante	13
I.4.5 Changement de phase à pression constante	13
I.4.5.1 Echauffement d'un liquide à pression constante	13
I.4.5.2 Refroidissement d'une vapeur surchauffée à pression constante	14
I.4.6 Le diagramme (p –v) de Clapeyron	15
I.5 Titre de la vapeur humide	15
I.5.1 Valeur massique d'une grandeur extensive de la vapeur humide	16

I.5.2	Chaleur latente de vaporisation	17
I.6	Dégivrage des évaporateurs	18
I.7	Potentiels thermodynamiques	19
I.7.1	Relations de Maxwell	19
I.7.2	Relation de Clapeyron	19
I.7.3	Calcul de l'énergie interne	20
I.7.4	Calcul de l'enthalpie	21
I.7.5	Calcul de l'entropie explicite en volume massique	22
I.7.6	Calcul de l'entropie explicite en pression	22
I.8	Conclusion	23

Chapitre II Critères de choix des équipements d'une installation frigorifique

II.1	Introduction.....	24
II.2	Choix et types d'évaporateurs.....	24
II.2.1	Evaporateurs à détente sèche	24
II.2.2	Evaporateurs noyés	25
II.2.3	Les évaporateurs à air à convection naturelle	25
II.2.4	Les évaporateurs à air à convection forcée	26
II.3	Dégivrage par résistances électriques	26
II.4	Les compresseurs et groupe de condensation	27
II.4.1	Les compresseurs hermétiques	27
II.4.2	Les compresseurs ouverts	28
II.4.3	Les compresseurs semi-hermétiques ou semi-ouverts	28
II.4.4	Notion de groupe de condensation	28
II.4.5	Choix du compresseur ou du groupe de condensation	28
II.5	Les condenseurs à air	29
II.5.1	Les condenseurs à air à convection naturelle	29
II.5.2	Les condenseurs à air à convection forcée	29
II.5.3	Choix du condenseur	29
II.6	Les détendeurs	30
II.6.1	Les tubes capillaires	30
II.6.2	Les détendeurs thermostatiques	30
II.6.2.1	Les détendeurs thermostatiques à égalisation de pression interne	31

II.6.2.2	Les détendeurs thermostatiques à égalisation de pression externe	32
II.6.2.3	Les détendeurs électroniques	33
II.6.3	Choix du détendeur thermostatique	33
II.7	Le réservoir de liquide	34
II.8	La bouteille anti-coup de liquide	34
II.9	Le séparateur d'huile	35
II.10	Le filtre déshydrateur	35
II.11	Les voyants	36
II.12	Amortisseur de vibrations	37
II.13	L'électrovanne	37
II.14	Les dimensions des tubes utilisés dans le domaine du froid	37
II.15	Conclusion	38

Chapitre III Réalisation d'un prototype d'une machine frigorifique 12volt

III.1	Introduction	39
III.2	Les différents composants du prototype	39
III.2.1	Le Compresseur	39
III.2.1.1	Les modifications apportées au compresseur <i>ZMC GL45AA</i>	40
III.2.1.2	Le condenseur	43
III.2.1.3	Le détendeur	44
III.2.1.4	L'évaporateur	44
III.3	Schéma simplifié de la partie frigorifique	45
III.4	Grandeur caractéristique	46
III.4.1	Grandeurs géométriques	46
III.4.1.1	Cylindrée <i>C</i>	46
III.4.1.2	Débit volumique balayé	47
III.4.1.3	Débit volumique aspiré	47
III.4.1.4	Débit massique	47
III.4.2	Mouvement du piston	48
III.5	Les différents composants de la machine frigorifique 12volt (Partie électrique)	48
III.5.1	Moteur asynchrone 12vDC :	48
III.5.1.1	Principe de fonctionnement	48
III.5.2	Pompe à huile électrique	49

III.5.3	Ventilateur hélicoïdal de refroidissement	49
III.5.4	Ventilateur tangentiel pour l'évaporateur	49
III.5.5	Carte électronique de commande	50
III.6	Conclusion partielle	51
III.7	Conclusion	53

Chapitre IV Généralités et dimensionnement des panneaux photovoltaïques

IV.1	Introduction	54
IV.2	Rayonnement solaire	54
IV.3	Principe de calcul de l'énergie solaire	55
IV.3.1	La déclinaison	55
IV.3.2	Les angles de repérage du soleil	56
IV.3.2.1	Cas particuliers	57
IV.3.3	Modèle simplifié de l'éclairement	58
IV.3.4	Rayonnement hors atmosphère	58
IV.3.5	Rayonnement solaire au sol	59
IV.4	Etudes du système photovoltaïque	60
IV.4.1	Historique de l'énergie photovoltaïque	59
IV.4.2	Principe de la conversion d'énergie photovoltaïque	61
IV.4.3	Technologies des cellules photovoltaïques	62
IV.5	Différentes configurations des systèmes photovoltaïques	63
IV.5.1	Système autonome sans batterie	63
IV.5.2	Système autonome avec batterie	63
IV.5.3	Systèmes fonctionnant à la présence du soleil	63
IV.5.4	Système avec appoint électrique	64
IV.5.5	Générateur photovoltaïque	64
IV.5.5.1	Influence de l'éclairement et la température	64
IV.5.5.2	Recherche du point optimal de fonctionnement	66
IV.6	Avantages et inconvénients de l'énergie solaire	67
IV.6.1	Avantage	67
IV.6.2	Inconvénients	68
VI.6	Conclusion	68
	CONCLUSION GENERALE	69

Résumé

Dans ce mémoire on a étudié les différents composants constitutifs d'une machine frigorifique, ainsi que leurs principe de fonctionnement ; afin de mettre en pratique mes connaissances acquise, et d'exploiter l'énergie solaire, nous avons réalisé une machine frigorifique fonctionnant à une tension d'alimentation de 12 volt continue produite par des panneaux photovoltaïque.

Abstract

In this paper we have studied a various components of refrigerating machine and their operating principle. In order to make my knowledge in practice, and harnessing solar energy, we have realized a prototype of refrigerating machine operating at a 12 volt power supply voltage produced by photovoltaic panels.

Mots clés : Machine frigorifique, Echangeur thermique, panneau photovoltaïque.

Key words : Refrigerating machine, heat exchanger, Photovoltaics panel.

Liste des figures

Chapitre I

Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique

Figure I.1	Les différents changements d'état de la matière.....	
Figure I.2	Schéma d'un système frigorifique à compression de vapeur simple.....	
Figure I.3	Représentation des trois phases d'une substance pure.....	
Figure I.4	Transition entre deux phases	
Figure I.5	Illustration du théorème de Maxwell.....	
Figure I.6	Changement de phase le long d'une isobare	
Figure I.7	Représentation de la courbe de saturation sur le diagramme (p, v)	
Figure I.8	Illustration des isothermes d'Andrews sur le diagramme (p, v)	
Figure I.9	Représentation du diagramme de Mollier du R134a	
Figure II.1	Modèle d'un évaporateur à détente sèche	24
Figure II.2	Model d'un échangeur appelé évaporateur noyé	25
Figure II.3	Modèle d'un évaporateur équipé d'une résistance de dégivrage.....	27
Figure II.4	Modèle d'un tube capillaire 1/16 (1,58mm) de diamètre.....	30
Figure II.5	Détendeur thermostatique à égalisation de pression interne.....	31
Figure II.6	Un bouteille de réservoir de fluide frigorigène condensé.....	34
Figure II.7	Bouteille anti-coups de liquide frigorigène.....	35
Figure II.8	Modèle d'un filtre déshydrateur 12 μ	36
Figure II.9	Modèle d'un voyant de fluide frigorigène avec indicateur d'humidité.....	36
Figure III.1	Vu interne d'un compresseur hermétique.....	
Figure III.2	Vu éclatée d'un compresseur hermétique.....	
Figure III.3	Schéma final de la machine frigorifique 12 volt.....	

Figure III.4	Condenseur utilisé dans l'installation.....
Figure III.5	Filtre déshydrateur 15 g.....
Figure III.6	Evaporateur de type Réf. ECOCLIM : 294C68.....
Figure III.7	Schéma détaillé de circuit frigorifique
Figure III.8	Sens et états de fluide frigorigène dans le circuit frigorifique.....
Figure III.9	Diagramme (P, h) de différentes étapes d'un cycle frigorifique
Figure III.10	Schéma représente le mouvement de piston dans la chemise.....
Figure III.11	Moteur asynchrone 12volt, 1450 tr/min
Figure III.12	Pompe à huile spéciale 12v DC.....
Figure III.13	Ventilateur de refroidissement 12V DC.....
Figure III.14	Ventilateur tangentiel 12 v DC
Figure III.15	Carte électronique universel U05PG

Abréviations

FF	Fluide frigorigène
SF	Surchauffe
NF	Normalement fermé
NO	Normalement ouvert
BP	basse pression
HP	Haute pression
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur photovoltaïque

Nomenclature

C	Capacité calorifique massique	$(kj/kg.K)$
h	Enthalpie massique	(kj/kg)
Δh	Variation d'enthalpie massique	(kj/kg)
m	Masse	(kg)
p	Pression de vapeur saturante	(bar)
s	Entropie massique	$(kj/kg.K)$
Δs	Variation d'entropie massique	$(kj/kg.K)$
T	Température	(K)
u	Energie interne massique	(kj/kg)
g	Enthalpie libre massique	(kj/kg)
f	Energie libre massique	(kj/kg)
v	Volume massique	(m^3/kg)
V	Volume	(m^3)
W	Travail	(m)
x	Titre de vapeur	(kj)
Q	Chaleur échangée	$(-)$
L_v	Chaleur latente de vaporisation	(kj)
<hr/>		
j	Nombre de jour	} degré (°)
ϕ	Latitude du lieu	
δ	Déclinaison	
a	Azimut	
a_0	Azimut au couché du soleil	
h	Hauteur du soleil	
h_m	Hauteur du soleil a midi	
i	Angle d'orientation par rapport au sol	
ω	Angle solaire	

ω_1	Angle solaire au lever		
ω_0	Angle solaire au couché		
G^*	Rayonnement global	}	W/m ²
G_h^*	Rayonnement global horizontal		
D^*	Rayonnement diffus		
D_h^*	Rayonnement diffus horizontal		
R^*	Rayonnement réfléchi		
S^*	Rayonnement direct		
S_h^*	Rayonnement solaire horizontal		
I^*	Densité de flux solaire direct		
E	Eclairement		
E_0	Eclairement max		
TSV	Temps solaire vrai	}	(h)
TS	Temps solaire		
R_s	Rapport d'éclairement direct		-
R_D	Rapport d'éclairement diffus		-
R_G	Rapport d'éclairement global		-
σ	Albédo		
DC	Courant direct (continu)		A
AC	Courant alternatif		volt
N_p	Nombre de cellules en série		-
N_s	Nombre de cellules en parallèle		-
GPV	Générateur photovoltaïque		-
I_{GPV}	Courant de générateur PV		A
V_{GPV}	Tension de générateur PV		volt

Lettres grecques

α	Coefficient de dilatation isobare : $(\partial v / \partial T)_p / v$	(-)
β	Coefficient de compressibilité isotherme : $(\partial p / \partial T)_T / \rho$	(-)

Indices

C	Etat critique thermodynamique
r	Grandeur réduite
réf	Relatif à un état de référence
sat	Relatif à un état de saturation
v	Vapeur
liq	Liquide
gaz	Gaz
rev	Réversible
eb	Ebullition

Exposants

'	Liquide saturé	
''	Vapeur saturée	
0	Relatif à l'état idéal	
C	cylindrée	m^3
n	Nombre de cylindre	-
V_{bal}	Volume balayé	m^3/s
N	Vitesse de rotation	tr/min
η_v	Rendement volumique	-
COP	Coefficient de performance	-
V	Volume aspiré	m^3/s
m_f	Débit massique	kg/s
d	Unité de bruit généré	db

INTRODUCTION GENERALE

Avec l'avènement de l'ère industrielle au 19^{ème} siècle, l'industrie du froid a pris une dimension socio-économique très importante. Depuis, l'utilisation des techniques du froid ne cessent de se diversifier touchant ainsi beaucoup de secteurs comme ceux de l'agro-alimentaire, le transport des denrées alimentaires, le conditionnement de l'air, les applications médicales et autres. Les études sont approfondies dans le domaine des transferts énergétiques. La thermodynamique, qui pose les principes fondamentaux gouvernant ces transferts, doit pouvoir être appliquée aux modèles reflétant les propriétés d'état des corps utilisés lors d'une transformation énergétique. À ce titre, l'équation d'état a une importance particulière. Le modèle du Gaz Parfait, établi au début du 19^{ème} siècle, reste encore aujourd'hui un modèle de référence qui permet de fixer les limites de comportement des gaz réels lorsque leurs pressions sont faibles.

De nombreux processus technologiques ont lieu pour atteindre des températures inférieures à celles qui peuvent être obtenues lors du refroidissement naturel, par l'eau ou par l'air. Le refroidissement au-dessous de la température ambiante s'appelle refroidissement artificiel ou forcé ; Pour obtenir du froid artificiel, les installations frigorifiques utilisent des fluides à bas point d'ébullition sous pression relativement faible.

Le fonctionnement de toute machine frigorifique à compression a besoin d'une source d'énergie électrique. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre nocive pour la planète ainsi que la pollution de l'atmosphère. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles, réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières, la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables, qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans le domaine de recherche et du développement.

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, l'énergiehydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque. L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre.

Aujourd'hui, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour faire fonctionner des équipements produisant du froid est une technologie récente caractérisée par des coûts graduellement en baisse ce qui permet la faisabilité de relier des sites éloignés du réseau électrique.

I.1 Introduction

La production du froid ne date pas d'hier puisque déjà en 1600 des scientifiques se sont aperçus qu'un mélange de neige et de sel abaissait suffisamment la température de l'eau pour former de la glace. La première machine de réfrigération à compression a vu le jour à Londres en 1834, et son inventeur est JACOBS PERKINS, qui c'est servi de l'éther comme réfrigérant. C'est en 1931 que l'industrie du froid connaît un bond majeur avec l'arrivée des gaz réfrigérants R12, R22 (en 1935) et R502 (en 1961), puis la réglementation évoluant, des nouveaux gaz sont apparus au fil des années (exemple du R134a vers 1993). Le gaz frigorigène appelé aussi réfrigérant est le fluide moteur des équipements frigorifiques (réfrigérateurs, chambres froides, climatiseurs, vitrines réfrigérées...) pour produire du froid. Son écoulement dans ces machines est diphasique et son état dépend des conditions de température et de pression.

Il y a deux procédés de production du froid :

- le procédé purement physique : changement d'état avec compression puis détente ;
- le procédé physico-chimique : échange de chaleur mis en jeu par l'absorption ou la désorption d'un gaz dans un liquide.

Le procédé par compression est le plus performant et le plus utilisé de nos jours.

I.2 Généralités :

I.2.1 Modes de production du froid et applications :

La production du froid qui consiste à absorber la chaleur contenue dans un milieu peut être obtenue suivant plusieurs modes. De même, les applications du froid sont très variées.

Parmi les différents modes de production du froid, on peut citer:

- ✓ La détente d'un gaz comprimé.
- ✓ La dissolution de certains sels.
- ✓ La vaporisation d'un liquide dans un circuit fermé.

La détente d'un gaz comprimé repose sur le principe de l'abaissement de la température d'un fluide lors de sa détente.

La dissolution d'un sel dans l'eau provoque un abaissement de la température de la solution. Ce n'est pas un phénomène très utilisé dans l'industrie frigorifique à cause de la nécessité de Vaporisation ultérieure de l'eau (récupération du sel).

Par exemple, le mélange de neige (4 parties) et de potasse (3 parties) fait baisser la température de la solution de 0°C à -40°C.

La vaporisation d'un liquide permet de produire du froid par l'absorption de la chaleur à travers un échangeur, la vapeur produite étant ultérieurement liquéfiée dans un autre échangeur, le fluide décrit ainsi un cycle au sein d'une machine fonctionnant de manière continue. Les machines utilisant ce principe peuvent être regroupées en deux grandes familles que sont les machines à compression mécanique et les machines à absorption.

La production du froid pour les besoins domestiques, commerciaux et industriels nécessitent l'utilisation d'un dispositif capable d'extraire de la chaleur dans le milieu à refroidir pour la rejeter dans un milieu dit extérieur, ce dispositif qui obéit nécessairement au second principe de la thermodynamique est appelé « *machine frigorifique* ».

I.2.2 La réfrigération :

La réfrigération consiste au maintien artificiel d'un produit, en dessous de sa température ambiante, à une température optimum pour sa conservation (température supérieure à la température de congélation ou température cryoscopique). Pratiquement la température minimale en réfrigération est de 0°C.

La durée de conservation est toujours limitée, elle est fonction de la nature du produit et de la température à laquelle elle est conservée.

La réfrigération freine les phénomènes vitaux des tissus vivants, tels que ceux des fruits et légumes et des tissus morts (viandes, poissons) en ralentissant les métabolismes biochimiques.

Elle va ralentir considérablement l'évolution microbienne et les conséquences de celle-ci (putréfaction, toxines, ...). Pour les produits morts tels que les viandes et les poissons, la durée pratique de conservation est d'une à quatre semaines à une température de 0°C (température assurant la conservation la plus prolongée en réfrigération) quelque soit le produit. Pour éviter le développement de bactéries pathogènes, la température doit rester inférieure à 4°C.

I.2.3 Quelques grandeurs physiques :

I.2.3.1 La température :

La température caractérise le niveau auquel la chaleur se trouve dans un corps permettant ainsi de dire qu'un corps est plus ou moins chaud qu'un autre; Dans le système international (S.I), les températures sont exprimées en °C (degrés Celsius) mais dans la littérature, on rencontre les degrés Fahrenheit (°F) et les Kelvin (K).

Conversion entre les différentes unités de températures

$$C^{\circ} = \frac{5}{9} \cdot (^{\circ}F - 32) \quad , \quad ^{\circ}F = \frac{9}{5} \cdot C^{\circ} + 32 \quad , \quad K = C^{\circ} + 273.15$$

La liquéfaction par compression d'un gaz ou d'une vapeur n'est plus possible au-delà d'une température limite, quelle que soit la pression exercée sur le gaz ou la vapeur: cette température limite a reçu le nom de *température critique*.

Exemple:

R13 :28,8°C ; R23 :25,9°C ; CO₂ :31°C, R134a :100,6°C; R12 :112°C ; R152a :113,5°C.

I.2.3.2 La chaleur :

La chaleur est une forme d'énergie qui va d'un point chaud vers un point froid. C'est la sensation perçue par nos organes de sens lorsque nous sommes placés devant un corps incandescent par exemple.

L'unité légale de chaleur est le Joule (J) mais la *kcal* (kilocalorie) est également utilisée. Une *kcal* est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kg d'eau pour augmenter sa température de 1°C.

Conversion d'unités :

$$1 \text{ kcal} = 4,185 \text{ kJ} = -1 \text{ Fg (Frigorie)}$$

$$1 \text{ BTU} = 1,053 \text{ kJ}, \quad 1 \text{ thermie (Th)} = 1000 \text{ kcal}$$

B.T.U = British Thermal Unit

A) Chaleur sensible et chaleur latente :

Un corps (ou une substance) peut recevoir ou fournir de la chaleur sous deux formes différentes.

➤ *Sous forme sensible :*

L'absorption de chaleur sous cette forme se manifeste par une élévation de la température du corps récepteur; ou bien, au contraire, fourni de la chaleur sa température s'abaisse.

Absorption ou fourniture de chaleur ne provoquent pas de modification d'état physique du corps, et la variation de température est fonction de la quantité de chaleur échangée et d'une caractéristique physique propre à chaque corps: sa *chaleur massique*.

➤ *Sous forme latente :*

L'absorption de chaleur par un corps sous cette forme ou la fourniture de chaleur par ce corps se caractérise par une constance de la température du corps et par son changement d'état physique.

B) Quantité de chaleur :

La quantité de chaleur à fournir ou à soustraire à un corps est proportionnelle à :

- la masse du corps,
- la variation de température qu'il a subie,
- sa chaleur massique.

D'où la formule générale donnant la quantité de chaleur échangée:

$$Q = C * M * \Delta\theta$$

I.2.3.3 La puissance :

La puissance est le rapport de l'énergie fournie ou absorbée sur l'unité de temps. L'unité légale est le Watt (W).

Conversion d'unités :

$$1 \text{ kW} = 860 \text{ kcal/h} \quad ; \quad 1 \text{ kcal/h} = 1 \text{ Fg/h} = 1,163 \text{ W} \quad ; \quad 1 \text{ CV} = 736 \text{ W}$$

I.2.3.4 La pression :

L'unité légale de la pression est le Pascal (Pa) qui est égal à la pression uniforme exercée par une force de 1 N (Newton) sur une surface de 1 m². L'unité de pression couramment utilisée par les frigoristes est le Bar.

Conversion d'unités :

$$1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa} = 1,02 \text{ kg/m}^2 = 0,986 \text{ atm} = 750 \text{ mmHg} = 10,2 \text{ mCE} = 14,54 \text{ PSI.}$$

PSI: Pound per Square Inch (Livre par Pouce carré).

I.2.3.5 Le changement d'état :

La maîtrise de deux états de la matière que sont la phase liquide et la phase vapeur est primordiale en froid. Le changement d'état se définit comme la phase de transformation d'une phase vers une autre phase, la figure (I.1) donne les différents changements d'état possibles de la matière.

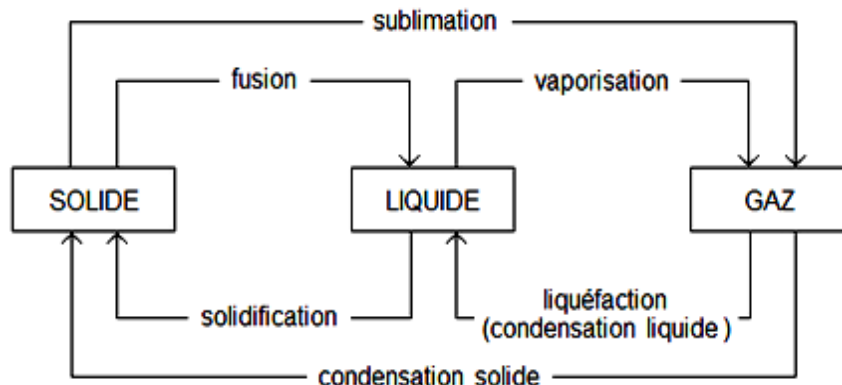


Figure I.1 Les différents changements d'état de la matière.

I.2.3.6 La vaporisation :

C'est le passage d'un corps de l'état liquide à l'état gazeux. Elle peut se faire par évaporation ou par ébullition.

➤ L'évaporation

C'est la formation de vapeur à la surface libre d'un liquide. Elle est d'autant plus rapide que:

- la température est élevée,
- la surface libre du liquide est grande,
- l'atmosphère est sèche et renouvelée,
- la pression est basse,
- la tension de la vapeur saturante du liquide est élevée.

➤ L'ébullition

C'est la vaporisation rapide d'un liquide avec formation de bulles de vapeur en son sein.

• Lois de l'ébullition

1. Sous une même pression, un liquide commence toujours à bouillir à la même température.
2. Pendant toute la durée de l'ébullition, la température reste constante si la pression elle-même reste constante.
3. La tension de vapeur saturante de la vapeur émise est égale à la pression supportée par le liquide.

- Point normal d'ébullition :

C'est la température d'ébullition sous la pression atmosphérique normale.

Exemple: Eau: 100 C° ; R12 :-30°C ; NH3 :-33,5C° ; R22 :-40,8 C° ; R134a :-26,3C°

Si l'on veut abaisser la température d'ébullition, il faut abaisser la pression supportée par le liquide en ébullition. Inversement, si l'on veut élever la température d'ébullition, il faut augmenter cette pression.

I.2.3.7 La condensation :

C'est le passage de l'état gazeux à l'état liquide. On obtient la condensation de la vapeur par deux moyens:

1. Par compression jusqu'à la pression correspondant à la tension de vapeur saturante du fluide à la température considérée.
2. Le refroidissement jusqu'à la température correspondant à la tension de vapeur saturante du fluide considéré.

I.2.4 Les fluides frigorigènes :

Le fluide frigorigène permet les échanges de chaleur dans un système frigorifique par ses changements d'état que sont l'évaporation et la condensation. Il peut se définir comme une substance chimique dont la température d'évaporation à la pression atmosphérique est inférieure à la température ambiante, autrement dit le fluide frigorigène doit être liquide à cette ambiance. Par température ambiante, il faut comprendre l'ambiance ou le milieu à refroidir.

Il est important pour un fluide frigorigène d'avoir une température d'évaporation peu élevée pour que le changement d'état soit réalisable. Le changement d'état s'effectue à température et pression constantes et c'est durant cette phase que la quantité de chaleur absorbée ou rejetée est la plus importante. Le fluide frigorigène étant un medium qui sert à évacuer de la chaleur et possède des caractéristiques physiques, thermodynamiques et chimiques. Il doit posséder les propriétés requises d'un bon fluide frigorigène que sont:

- ne pas détruire la couche d'ozone
- avoir un faible potentiel d'effet de serre
- avoir une grande chaleur latente de vaporisation
- avoir un point d'ébullition sous la pression atmosphérique suffisamment bas compte tenu des conditions de fonctionnement désirées (de sorte que la température d'évaporation soit toujours à un niveau plus élevé que la température correspondante à la pression atmosphérique)
- avoir une température critique élevée (de sorte que la température de condensation dans les conditions d'utilisation soit bien inférieure à cette température critique)
- avoir un faible rapport de compression, c'est à dire faible rapport entre les pressions de refoulement et d'aspiration
- avoir un faible volume massique de la vapeur saturée rendant possible l'utilisation d'un compresseur et de tuyauteries de dimensions réduites
- ne pas avoir d'action sur le lubrifiant (huile) employé conjointement
- être non toxique et sans effet sur la santé du personnel
- être non inflammable et non explosif en mélange avec l'air,
- être non corrosif, pas d'action sur les métaux constituant le circuit, pas d'action sur les joints
- sans odeur ou n'ayant qu'une odeur non désagréable'
- sans action sur les denrées à conserver
- être d'un coût peu élevé et d'un approvisionnement facile
- fuites faciles à détecter et à localiser par méthode visuelle

Il faut bien comprendre qu'aucun des fluides utilisés ne possède l'ensemble de ces qualités. Donc en fonction des applications, certaines de ces qualités seront à privilégier au détriment des autres.

I.2.5 Organes principaux d'une machine frigorifique

La machine frigorifique est composée de quatre organes principaux que sont:

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

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)

I.3 Principe de production du froid :

Le système frigorifique à compression de vapeur le plus courant fonctionne grâce à un fluide frigorigène situé dans un circuit fermé, comprenant un compresseur, un condenseur, un organe de détente, un évaporateur et des tuyauteries de raccordement (Figure I.1).

La vapeur du fluide frigorigène comprimée à haute pression est condensée à haute température dans le condenseur par transfert de chaleur (Q_C) vers le milieu environnant. La pression du frigorigène à l'état liquide est réduite dans le détendeur. A basse pression et basse température, le frigorigène se vaporise, ce qui permet d'extraire la chaleur (Q_F) de la substance à refroidir. Pour compléter le cycle, à la sortie de l'évaporateur, la vapeur du frigorigène à basse pression est comprimée et portée à haute pression par le compresseur. La chaleur totale rejetée au niveau du condenseur correspond à la somme de la chaleur extraite à l'évaporateur et de l'énergie (w_c) consommée par le compresseur

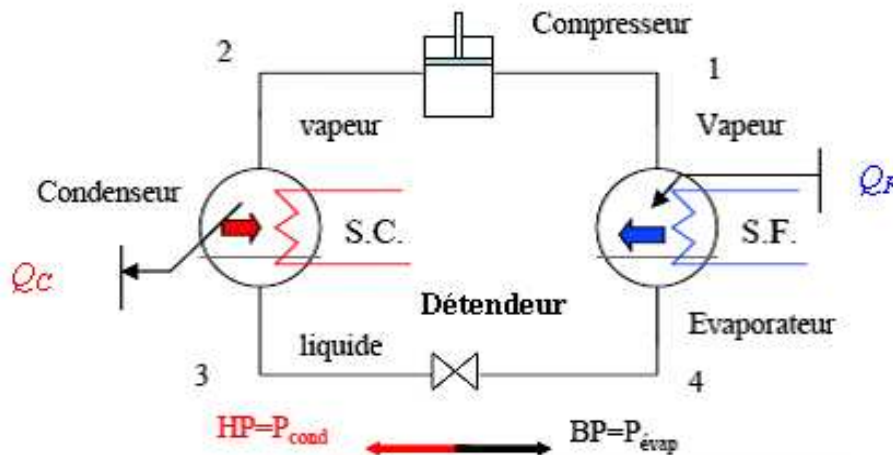


Figure I.2 Schéma d'un système frigorifique à compression de vapeur simple

Le cycle de fonctionnement d'un tel circuit se décompose en quatre étapes :

1→2 Le compresseur comprime le gaz frigorigène et élève donc sa pression et sa température.

2→3 En passant dans le condenseur, le gaz frigorigène réchauffé, cède une partie de ses calories au milieu chaud (dont la température est moins élevée) et se transforme au fur et à mesure en liquide.

3→4 Le détendeur fait baisser la pression et donc la température du fluide.

4→1 En passant dans l'évaporateur, sa température étant plus basse que celle du milieu froid, le fluide en capte les calories, se transforme progressivement en vapeur et le cycle recommence.

I.4 Transitions de phase :

I.4.1 Diagramme (P –T) :

Un corps pur est une substance qui a une composition chimique homogène et stable, elle peut exister sous différentes phases mais sa composition chimique est la même dans chacune d'elle. On a représenté sur la figure (I.2) les trois phases d'une substance pure.

On sait que l'eau par exemple bouille à 100 °C sous la pression atmosphérique normale (1013 mbar). Mais si l'on fait bouillir de l'eau au sommet d'une montagne (4810 m), la température d'ébullition de l'eau est seulement de 85°C. Pour chaque corps, il existe une relation précise entre pression et température d'ébullition et on peut la tracer. Il existe aussi une correspondance entre la température de fusion et la pression. T est le point de rencontre

entre les courbes, il s'appelle le point triple (voir Figure I.3), c'est uniquement en ce point précis que le fluide peut se trouver dans les trois états simultanément. (C) est le point critique, au delà duquel il n'y a plus de différence entre liquide et gaz. Pour l'eau $T_C = 374 \text{ °C}$ et $p_C = 218 \text{ atm}$ [1].

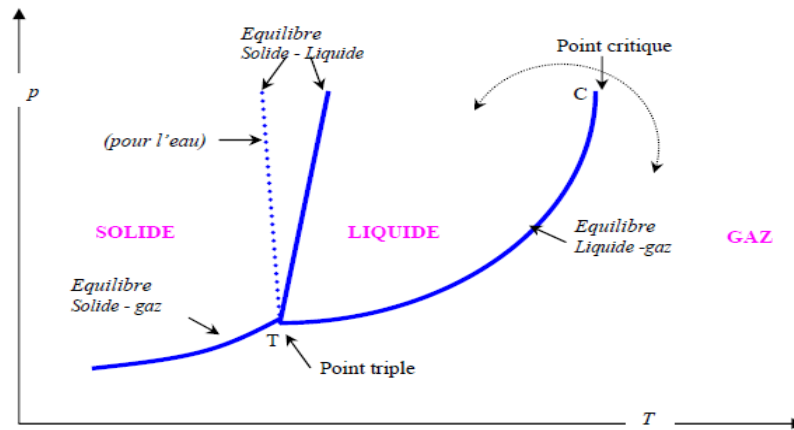


Figure I.3 Représentation des trois phases d'une substance pure [1].

- Le passage de la phase solide à la phase liquide est appelé fusion, l'inverse solidification ou cristallisation.
- Le passage de la phase liquide à la phase gazeuse est appelé vaporisation, l'inverse liquéfaction ou condensation liquide.
- Le passage de la phase solide à la phase gazeuse est appelé sublimation, l'inverse condensation solide.

I.4.2 Equilibre entre deux phases

L'équation de l'enthalpie libre $g_A(T, p) = g_B(T, p)$ définit une ligne dans le diagramme (p, T), c'est la courbe de coexistence des deux phases. Lorsqu'une substance subit une transition de phase, elle échange de l'énergie avec l'extérieur, à la fois sous forme de travail (parce que son volume varie) et sous forme de chaleur. Le passage de A à B s'effectue à T ou p fixe (Figure I.4) et on a donc :

$$Q_{A \rightarrow B} = H_B - H_A = \Delta H_{A \rightarrow B} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$$L_{A \rightarrow B} = Q_{A \rightarrow B} / \text{masse} \quad (\text{I.2})$$

$L_{A \rightarrow B}$ Est la chaleur latente de la transition, elle n'est définie que dans les conditions de la coexistence, c'est donc une fonction de T (ou p) seulement. Si h et S sont l'enthalpie et l'entropie massiques dans les conditions de la coexistence, on a :

$$L_{A \rightarrow B} = h_B - h_A = T (S_B - S_A) = T (V_B - V_A) \cdot \left(\frac{dP}{dT}\right)_{coex} \quad (I.3)$$

L'égalité centrale dans (I.3) est immédiate avec $g = h - TS$ et $g_A = g_B$. Pour tous les corps purs, les chaleurs latentes de fusion, de vaporisation et de sublimation sont strictement positives d'après l'égalité centrale de (I.2), parce que l'entropie de la vapeur est supérieur à l'entropie du liquide et supérieur à l'entropie du solide.

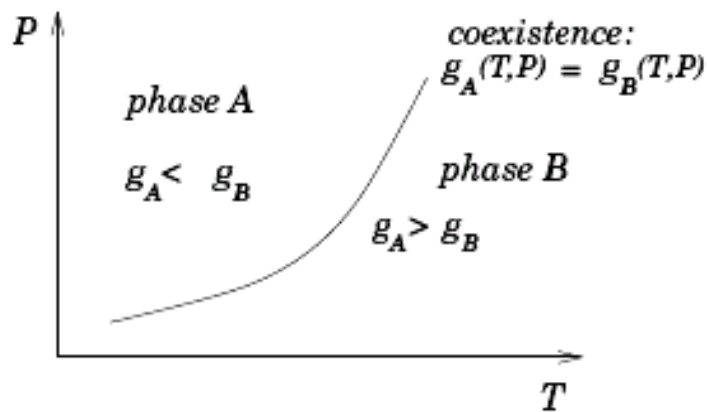


Figure I.4 Transition entre deux phases [1].

I.4.3 Construction de maxwell [1]

Les équations d'état ne rendent pas directement compte de l'apparition de deux phases distinctes et de l'existence d'un palier d'équilibre liquide-vapeur. Une isotherme construite d'après l'équation de *Van der Walls*, au dessous de T_c , l'allure illustrée dans la figure ci-dessous. Une droite horizontale coupe l'isotherme en trois points : A, I et B. D'après le théorème de Maxwell, cette droite coïncide avec le palier de liquéfaction AB lorsque les deux aires AMI et INB (hachurées sur la figure I.5) sont égaux.

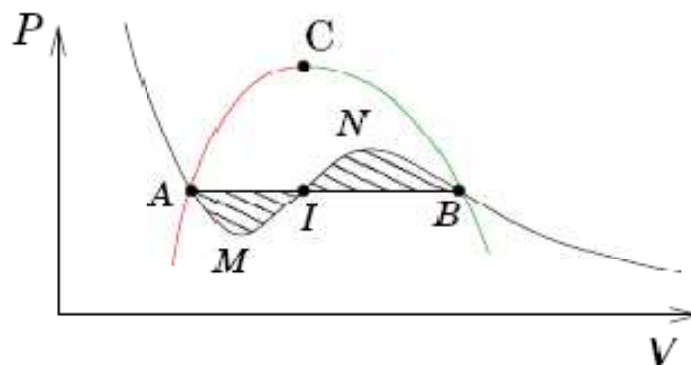


Figure I.5 Illustration du théorème de Maxwell [1].

Ce théorème peut être démontré de manière très économique et élégante : on peut former un cycle monotherme en allant de A à B le long de l'isotherme curviligne AMINB et en revenant de B à A par le palier horizontal BA (en faisant alors subir au système une transition de phase). Si ce cycle peut être décrit de façon réversible, le travail associé doit être nul puisque $0 = \Delta U = W_{rev} + Q_{rev}$ et $0 = \Delta S = Q_{rev}/T$. Or ce travail est représenté par l'aire des deux boucles, l'une INBI décrite dans le sens des aiguilles d'une montre ($W < 0$), l'autre AMIA décrite dans le sens inverse ($W > 0$). Donc, en valeur absolue, les deux aires sont égales.

I.4.4 Vaporisation d'un liquide et liquéfaction d'un gaz :

On peut vaporiser un liquide en augmentant sa température à pression constante ou en diminuant sa pression à température constante, Comme la vaporisation de l'eau sous la pression atmosphérique ou dans le vide. La liquéfaction est le phénomène inverse.

I.4.4.1 Température d'ébullition :

Sous une pression déterminée, un corps pur commence toujours à bouillir à la même température, appelée température d'ébullition ou de saturation sous la pression considérée qu'on note $T_{eb}(p)$. La température d'un liquide en ébullition reste constante durant toute la durée de l'ébullition tant que la pression ne varie pas.

I.4.4.2 Pression de vapeur saturante :

A une température donnée, un corps pur commence toujours à bouillir à la même pression, appelée pression ou tension de vapeur saturante à la température considérée qu'on note $p_s(T)$. La pression d'un liquide en ébullition reste constante durant toute la durée de l'ébullition tant que la température ne varie pas.

I.4.5 Changement de phase à pression constante :

Sur la figure (I.6), on a représenté les différentes étapes d'un changement de phase le long d'une isobare.

I.4.5.1 Echauffement d'un liquide à pression constante :

Les différentes étapes de l'échauffement d'une substance pure sont représentées sur la figure suivante :

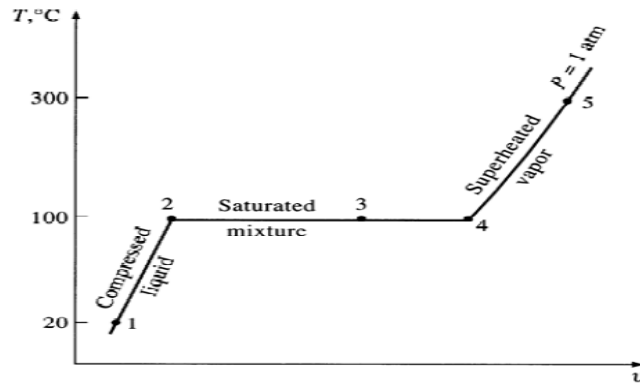


Figure I.6 Changement de phase le long d'une isobare [2].

1→2 Echauffement du liquide, la température augmente de T_1 à T_2 et légèrement le volume de V_1 à V_2 . A la température T_2 , apparaît la première bulle de vapeur. C'est le début de l'ébullition et T_2 est appelée la température d'ébullition sous la pression p et on écrit alors $T = T_{\text{eb}}(p)$.

2→3 Vaporisation partielle du liquide, tandis que le volume augmente de V_2 à V_3 la température reste constante. A l'état 3, on a un mélange de liquide et de vapeur.

3→4 Vaporisation du reste du liquide, la température reste constante durant toute l'ébullition $T_2 = T_3 = T_4 = T_{\text{eb}}(p)$, le volume augmente de V_3 à V_4 . A l'état 4 disparaît la dernière goutte de liquide.

4→5 Surchauffe de la vapeur, la température augmente de nouveau de T_4 à T_5 et le volume de V_4 à V_5 .

I.4.5.2 Refroidissement d'une vapeur surchauffée à pression constante :

C'est le chemin inverse du processus précédent.

5→4 Refroidissement de la vapeur, le volume diminue de V_5 à V_4 et la température de T_5 à T_4 . A la température T_4 apparaît la première goutte de liquide. C'est le début de la condensation et la température T_4 est appelée température de condensation sous la pression p et on écrit $T_4 = T_{\text{cond}}(p)$. A noter que $T_{\text{cond}}(p) = T_{\text{eb}}(p)$.

4→2 Liquéfaction de la vapeur, le volume va diminuer de V_4 à V_2 et la température reste constante au cours de la condensation $T_4 = T_2$. A l'état 2 disparaît la dernière bulle de vapeur.

2→1 Sous refroidissement du liquide, la température diminue de nouveau de T_2 à T_1 et le volume de V_2 à V_1 .

I.4.6 Le diagramme (p – v) de Clapeyron :

On peut obtenir ce changement en détendant un liquide ou inversement en comprimant une vapeur surchauffée. On a représenté la courbe de saturation sur le diagramme (p, v) ainsi que certaines détentes (ou compressions) à température constante (Figure I.7). L'isotherme critique passe par le point critique

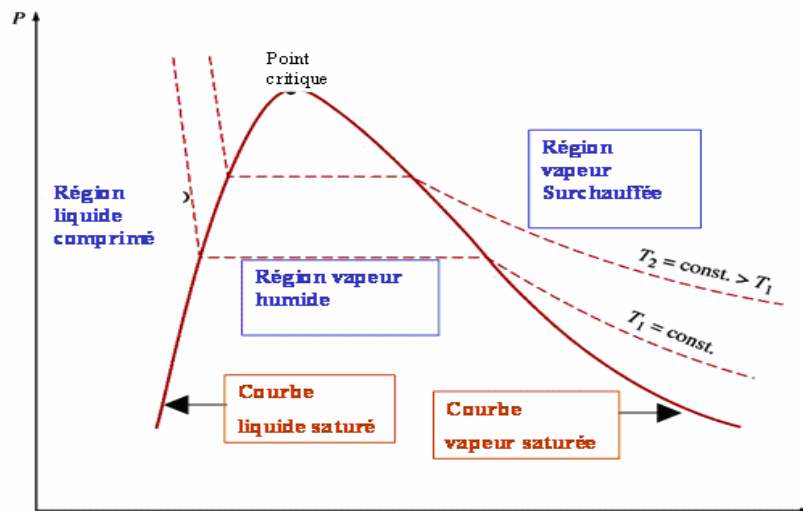


Figure I.7 Représentation de la courbe de saturation sur le diagramme (p, v) [2].

I.5 Titre de la vapeur humide :

La vapeur humide est un mélange de liquide saturé et de vapeur saturée ; Le titre d'une vapeur humide est le rapport de la masse de la vapeur saturée sur celle du mélange. Soient : M' la masse de la phase liquide (liquide saturé), M'' la masse de la phase vapeur (vapeur saturée), à la coexistence on écrit :

$M = M' + M''$, la masse du mélange (vapeur humide).

$x = M''/M$, est le titre de la vapeur humide.

Pour tout ce qui suit : les grandeurs du liquide saturé sont écrites avec l'exposant (') et les grandeurs de la vapeur saturée avec l'exposant (").

M étant le point représentatif du système sur l'isotherme dit d'Andrews on a donc

$x = MB/AB$, cette relation est connue sous le nom de théorème des moments

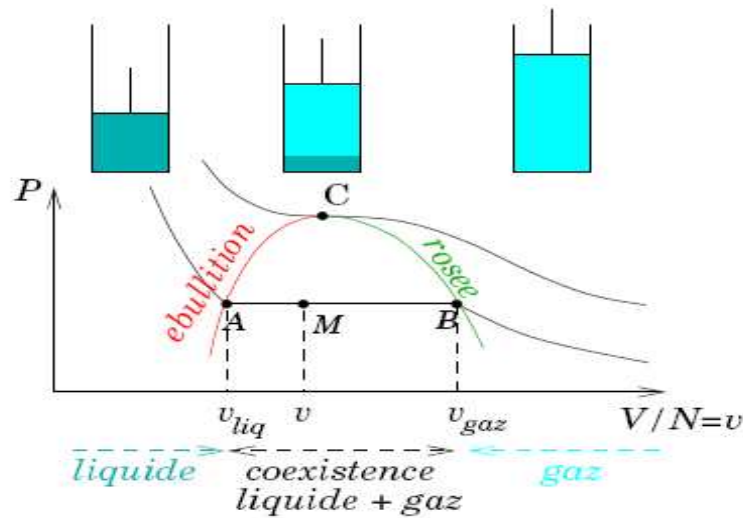


Figure I.8 Illustration des isothermes d'Andrews sur le diagramme (p, v) [1].

I.5.1 Valeur massique d'une grandeur extensive de la vapeur humide :

Cas où la température est connue :

Soit Φ une grandeur extensive de la vapeur humide (Φ peut être le volume, l'énergie interne, l'enthalpie, l'entropie, etc. ...) et $\varphi(T)$ sa valeur massique correspondante à la température T.

Φ' est la grandeur extensive du liquide saturé et $\varphi'(T)$ sa valeur massique correspondante à la température T.

Φ'' est la grandeur extensive de la vapeur saturée et $\varphi''(T)$ sa valeur massique correspondante à la température T.

On a :

$$\Phi = \Phi' + \Phi'' \tag{I.4}$$

Pour une vapeur humide de titre x, on a :

$$\begin{cases} \varphi = \varphi x \\ \Phi = \Phi x \end{cases}$$

$$\Phi x = M \varphi x = M' \varphi'(T) + M'' \varphi''(T) \tag{I.5}$$

Sachant que :

$$M' = M - M'' \tag{I.6}$$

La combinaison des formules (I.5) et (I.6) donne :

$$M \varphi x = (M - M'') \varphi'(t) + M'' \varphi''(t) \tag{I.7}$$

$$M (\varphi_x - \varphi'(T)) = M'' (\varphi''(T) - \varphi'(T)) \quad (\text{I.8})$$

En divisant les deux termes de la dernière équation par M, on obtient :

$$\varphi_x - \varphi'(T) = x . (\varphi''(T) - \varphi'(T)) \quad (\text{I.9})$$

Et réciproquement si on connaît une des grandeurs massiques du mélange, on détermine le titre de la vapeur humide par la relation suivante :

$$x = \frac{\varphi_x - \varphi'(T)}{\varphi''(T) - \varphi'(T)} \quad (\text{I.10})$$

Cas où la pression est connue :

$$x = \frac{\varphi_x - \varphi'(P)}{\varphi''(P) - \varphi'(P)} \quad (\text{I.11})$$

I.5.2 Chaleur latente de vaporisation :

Il y a des notions de physique indispensables à la compréhension d'un système. Tous les fluides (eau, fréon, etc.) ont des particularités, et celles qui nous intéressent sont :

- la relation qui existe entre pression et température du fluide ;
- leur chaleur latente et sensible ;
- leur capacité à se condenser et s'évaporer facilement.
- Exemple pour l'eau à pression atmosphérique :
- chaleur sensible : 115.3 Wh/kg
- chaleur latente : 627.3 Wh/kg

L'apport de chaleur à un système ne fait pas toujours donc varier sa température. La température reste constante lorsqu'une substance change de phase, lorsqu'elle passe par exemple de l'état solide à l'état liquide, on distingue :

La chaleur latente de fusion d'un solide est la quantité de chaleur nécessaire pour fondre 1 kg de cette substance : $\Delta Q = m C_f$.

Pour l'eau, la chaleur de vaporisation est : $C_v = 2,26.10^6$ J/ kg à 373,15 K et 1 atm

Ainsi la chaleur latente (ou enthalpie) de vaporisation est la quantité de chaleur nécessaire pour convertir, à pression (ou à température) constante, 1 kg de liquide saturé en vapeur saturante sèche.

Si la température est donnée, on a :

$$Lv(T) = h''(T) - h'(T) \quad (\text{I.12})$$

$$Lv(P) = h''(P) - h'(P) \quad (\text{I.13})$$

La chaleur totale emmagasinée par un corps se concrétise par la chaleur sensible (liée à la température) et la chaleur latente (à l'état physique). L'addition des deux nous donne l'enthalpie, une grandeur qui sert à déterminer la chaleur donnée ou reprise à un corps. Si on applique tout ça (pression, température, état physique et enthalpie) dans un diagramme, on obtient un diagramme de Mollier, en ce qui nous concerne le diagramme du R134a [3]:

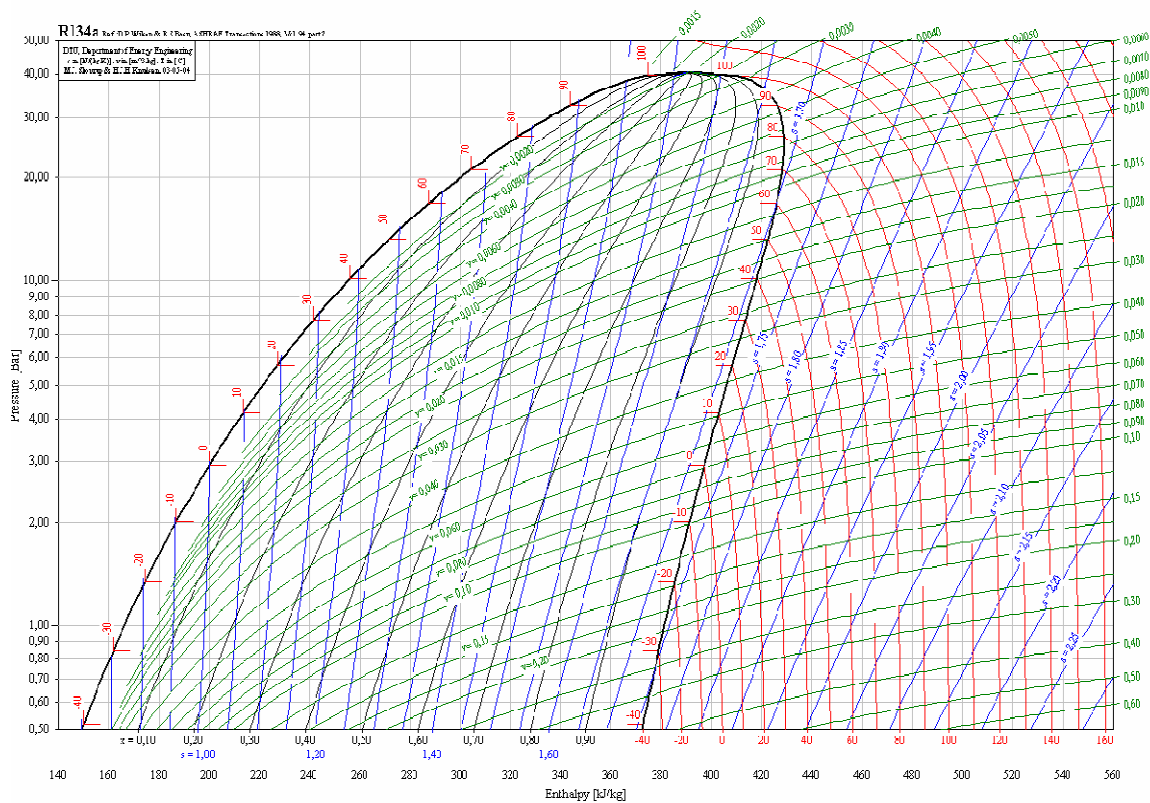


Figure I.9 Représentation du diagramme de Mollier du R134a [3].

I.6 Dégivrage des évaporateurs

Lorsque la température superficielle de la section d'échange (tubes à ailettes) 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 d'air ambiant
- dégivrage à l'eau
- dégivrage à la saumure
- dégivrage par résistances électriques
- dégivrage par gaz chauds

I.7 Potentiels thermodynamiques :

On connaît déjà l'énergie interne et l'enthalpie qui vérifient :

$$du = Tds - pdv \quad dh = Tds + vdp \quad (\text{I.14})$$

On définit l'énergie libre $f = u - Ts$ et l'enthalpie libre $g = h - Ts$

On obtient :

$$df = sdT - pdv \quad dg = -sdT + vdp \quad (\text{I.15})$$

I.7.1 Relations de Maxwell [4] :

Avec les équations (I.14) et (I.15) de l'identité thermodynamique on obtient immédiatement

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s &= -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_v & \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s &= \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \\ \left(\frac{\partial S}{\partial v}\right)_T &= \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v & \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T &= -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.16})$$

I.7.2 Relation de Clapeyron [4] :

Soit (q) le transfert thermique reçu par un système lors d'une transformation infinitésimale réversible. On peut alors écrire :

$$\delta q = cv dT + l dv = cp dT + k dp \quad (\text{I.17})$$

l : est une grandeur intensive, appelée coefficient de chaleur de dilatation isotherme et k est une grandeur extensive appelée coefficient de chaleur de compression isotherme. Ce sont des fonctions d'état, ce qui conduit à :

$$T \left(\frac{\delta s}{\delta T}\right)_v = c_v(T), \quad T \left(\frac{\delta s}{\delta T}\right)_P = c_p(T) \quad (\text{I.18})$$

$$T \left(\frac{\delta s}{\delta v}\right)_T = l, \quad T \left(\frac{\delta s}{\delta P}\right)_T = k \quad (\text{I.19})$$

En utilisant les relations de Maxwell appropriées, l'équation (I.19) se transforme en :

$$T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = 1, \quad - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = k \quad (\text{I.20})$$

I.7.3 Calcul de l'énergie interne :

On sait que la différentielle totale de $(u) = T(u, v)$ s'écrit :

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv \quad (\text{I.21})$$

Ainsi que :

$$T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = c_v(T) \quad (\text{I.22})$$

A partir des relations de Maxwell, on obtient :

$$du = \partial w + \partial q = -pdv + Tds \rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p = \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)_T \quad (\text{I.23})$$

$$dh = du + d(pv) = vdp + Tds \rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_v = \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)_T \quad (\text{I.24})$$

A partir de la relation (I.14) :

$$Tds = du + pdv = \left(\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right) dv + c_v(T) dT \quad (\text{I.25})$$

Alors que :

$$T \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T = \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = T \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T - p \quad (\text{I.26})$$

Ce qui nous conduit à :

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \quad (\text{I.27})$$

En fin :

$$du = \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv + c_v(T) dT$$

$$\Delta u_{1 \rightarrow 2} = \int_{v_1}^{v_2} \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv + \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT \quad (\text{I.28})$$

I.7.4 Calcul de l'enthalpie :

On sait aussi que la différentielle totale de $h = h(p, T)$ s'écrit :

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp + \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT \quad (\text{I.29})$$

Ainsi que :

$$T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = c_p(T) \quad (\text{I.30})$$

A partir de la relation (I.14) :

$$T ds = dh - v dp = \left(\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T - v\right) dp + c_p(T) dT \quad (\text{I.31})$$

Alors que :

$$T \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T - v \rightarrow \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = T \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T + v \quad (\text{I.32})$$

Ce que nous conduit à trouver :

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p + v \quad (\text{I.33})$$

Alors que :

$$T \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T - v \rightarrow \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = T \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T + v \quad (\text{I.34})$$

Ce qui conduit à trouver :

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p + v \quad (\text{I.35})$$

En fin :

$$dh = [v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p]_T dp + c_p(T) dT \quad (\text{I.36})$$

$$\Delta h_{1 \rightarrow 2} = \int_{p_1}^{p_2} [v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p]_T dp + \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \quad (\text{I.37})$$

I.7.5 Calcul de l'entropie explicite en volume massique :

Les relations de maxwell, par l'application de la différentielle totale, nous permettent d'écrire :

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T dv + \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v dT \quad (\text{I.38})$$

$$Tds = du + pdv \quad -$$

La dérivée par rapport la température à un volume constant, nous donne :

$$T\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v = c_v(T) \quad (\text{I.39})$$

Finalement la relation donnant la variation de l'entropie :

$$ds = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv + \frac{dT}{T} c_v(T) \quad (\text{I.40})$$

$$\Delta s_{1 \rightarrow 2} = \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv + \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} c_v(T) \quad (\text{I.41})$$

I.7.6 Calcul de l'entropie explicite en pression

Les relations de maxwell, par l'application de la différentielle totale de $s=s(p, T)$, nous permettent d'écrire :

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T dp + \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p dT \quad (\text{I.42})$$

$$Tds = dh - vdp \quad -$$

La dérivée par rapport à la température à pression constante, nous donne :

$$T\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = c_p(T) \quad (\text{I.43})$$

Finalement la relation donnant la variation de l'entropie :

$$ds = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp + \frac{dT}{T} c_p(T) \quad (\text{I.44})$$

$$\Delta s_{1 \rightarrow 2} = -\int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp + \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} c_p(T) \quad (\text{I.45})$$

I.8 Conclusion

En ce chapitre, on voulait montrer le concept de la production du froid, par compression de vapeurs, la quantité de chaleur utile dans notre cas est celle qui est absorbée du milieu froid ou à refroidir, cela devient possible grâce à l'échangeur de chaleur (évaporateur) dans lequel passe le fréon en double phase <liquide – vapeur> provenant du détendeur. Le titre de la vapeur humide jouera un rôle important pour le rendement de la machine frigorifique.

II.1 Introduction

Dans le domaine de production du froid, on rencontre plusieurs éléments, qui jouent des rôles principaux dans les systèmes de production du froid domestique ou bien industriel ; dans ce chapitre, on va essayer de définir tout les éléments constituant cette machine de production du froid qui est la machine frigorifique.

II.2 Choix et types d'évaporateurs

Les évaporateurs sont des échangeurs thermiques à convection naturelle ou forcée, entre le fluide frigorigène (FF) et le fluide à refroidir. La vaporisation du FF à l'intérieur des tubes de l'évaporateur absorbe la chaleur du milieu extérieur.

Le choix d'un évaporateur se repose sur la taille et la puissance de la machine frigorifique à concevoir.

Il existe différentes type d'évaporateurs selon leur mode de fonctionnement :

- les évaporateurs à détente sèche ou à surchauffe
- les évaporateurs noyés ou évaporateurs à regorgement
- Les évaporateurs à air à convection naturelle
- Les évaporateurs à air à convection forcée

II.2.1 Evaporateurs à détente sèche

Dans ce type d'évaporateurs, les vapeurs du FF sont surchauffées, Ils sont le plus souvent alimentés par un détendeur thermostatique qui ne permet que le passage d'une quantité du FF liquide correspondante à celle qui sera complètement évaporée dans l'évaporateur en fonction de sa charge thermique ; Ce type d'évaporateurs reposant sur ce principe de fonctionnement est le plus utilisé.



Figure II.1 Modèle d'un évaporateur à détente sèche

II.2.2 Evaporateurs noyés

Le principe de fonctionnement de ces évaporateurs est que les surfaces d'échange doivent toujours être en contact avec du FF liquide. Cet objectif est atteint en immergeant les tubes contenant le fluide à refroidir dans le FF liquide en ébullition. Ces évaporateurs sont caractérisés par des coefficients d'échange très élevés et peu variables par rapport à ceux des évaporateurs à détente sèche. Cependant ce type de fonctionnement présente des inconvénients:

- la surchauffe est pratiquement nulle d'où la nécessité de prémunir un dispositif anti-coups de liquide pour la protection des compresseurs.
- le piégeage de l'huile dans l'évaporateur lorsque celui-ci est miscible avec le FF. Ce type d'évaporateurs n'est pas couramment utilisé et on le trouve dans l'industrie frigorifique pour des installations comportant des compresseurs centrifuges ou à ammoniac.

Voilà un modèle d'un évaporateur noyé (Figure II.2) :

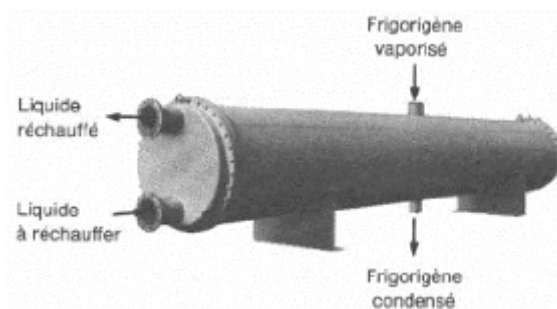


Figure II.2 Modèle d'un échangeur appelé évaporateur noyé.

Il existe deux familles d'évaporateurs suivant le fluide à refroidir (eau ou air).

Étant donné que notre fluide à refroidir est de l'air, nous nous intéressons seulement aux évaporateurs à air.

On distingue deux types d'évaporateurs à air à savoir:

- les évaporateurs à air à convection naturelle
- les évaporateurs à air à convection forcée

II.2.3 Les évaporateurs à air à convection naturelle

On distingue les évaporateurs à tubes lisses et les évaporateurs constitués de tubes à ailettes. Leurs coefficients globaux d'échanges thermiques sont généralement faibles

(inférieurs à $15\text{W/m}^2\cdot\text{C}^\circ$) et ils sont utilisés pour des puissances frigorifiques relativement faibles (froid ménager, réfrigérateurs, congélateurs,...).

II.2.4 Les évaporateurs à air à convection forcée

C'est le type d'évaporateur le plus rencontré dans plusieurs applications (conservation des denrées «chambres froides », climatisation, réfrigérateurs No Frost...).

Ils sont constitués de tubes à ailettes et sont munis d'un (ou plusieurs) ventilateur(s) pour assurer la circulation de l'air à travers les surfaces d'échanges.

Les tubes comportent des ailettes de forme rectangulaire, ils sont disposés en série formant une nappe, et les différentes nappes sont associées en parallèle.

Deux configurations sont généralement admises:

- les nappes sont assemblées en parallèle aussi bien à l'entrée qu'à la sortie de l'évaporateur, dont le collecteur d'entrée est alimenté par le détendeur.
- les nappes sont assemblées en parallèle seulement à la sortie, chaque entrée de nappe reçoit une fraction du FF injecté par l'intermédiaire du distributeur de liquide et d'un tube capillaire d'alimentation.

Le coefficient global d'échange de ce type d'évaporateur est compris entre 15 et $50\text{W/m}^2\cdot\text{C}^\circ$.

II.3 Dégivrage et déshumidification par résistances électriques

Est la technique la plus utilisée pour les petites et moyennes puissances, car l'air ambiant autour de l'évaporateur contient de l'eau. Cette eau givre au contact des surfaces froides lorsque la température dans l'évaporateur est inférieure à 0° . L'introduction des résistances de dégivrage a pour effet de dégivrer le givre sur la surface de l'évaporateur ce qui :

- augmente le transfert thermique entre l'air et la surface extérieure de l'évaporateur
- évite la diminution du flux de l'air soufflé par le ventilateur entre les ailettes de l'évaporateur, ce qui augmente l'apport de froid vers le milieu à refroidir.
- Le réfrigérant s'évapore entièrement dans l'évaporateur.
- diminue le taux d'humidité dans le milieu à refroidir

Les résistances électriques sont placées au niveau de la section d'échange de l'évaporateur (les épingles chauffantes sont généralement fixées parallèlement aux tubes) et la mise en route de la séquence de dégivrage est généralement pilotée par une carte électronique

contenant un relais qui se met en marche en alimentant les résistances suivant un signal d'un capteur de givre.

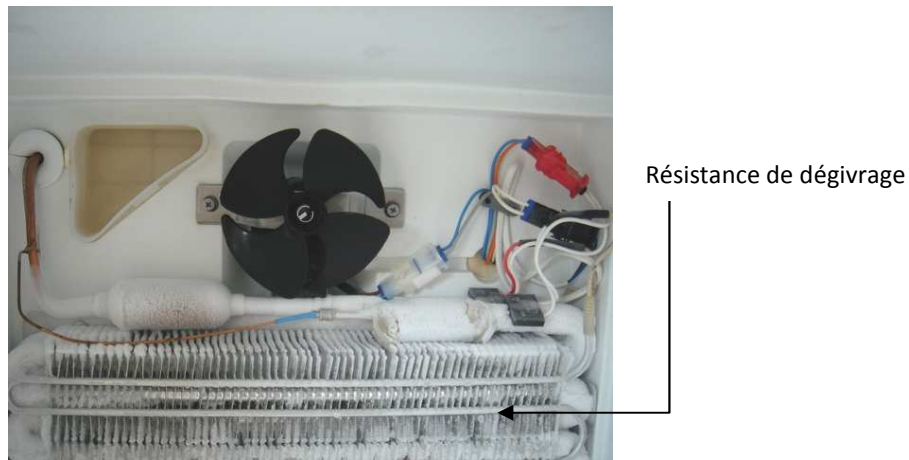


Figure II.3 Modèle d'un évaporateur équipé d'une résistance de dégivrage

II.4 Les compresseurs et groupe de condensation

Lorsqu'on parle de compresseur, on sous entend moto-compresseur, comme étant lapartie mécanique entraînée par un moteur électrique. Suivant le type de liaison ou d'associationentre les deux parties, on distingue:

- les compresseurs hermétiques
- les compresseurs ouverts
- les compresseurs semi-hermétiques ou semi-ouverts

II.4.1 Les compresseurs hermétiques

Le moteur électrique et le compresseur sont enfermés dans la même enveloppe sans possibilité d'accès à chacune des parties de manière isolée, l'ensemble est supporté généralement par des ressorts pour amortir les vibrations. Le compresseur aspire les vapeurs du fluide frigorigène à l'intérieur de l'enveloppe où lerefoulement est effectué à travers une tuyauterie souple brasée à l'enveloppe. Le moteur électrique est alimenté par des fils reliés à des bornes étanches. L'étanchéité de ces compresseurs est assurée par des joints fixes (passage des fils et des tuyauteries). Ce type de compresseur est utilisé pour les petites puissances (réfrigérateurs, climatiseurs,...) et les moyennes puissances (refroidisseurs de liquides, armoires de climatisation...).

II.4.2 Les compresseurs ouverts

Le moteur électrique et le compresseur sont associés par un organe de liaison qui peut être un manchon d'accouplement ou une ou plusieurs courroies. L'accès aux différents éléments du compresseur et du moteur est possible. Dans ce type de compresseur, la vitesse de rotation est ajustable et modifiable en changeant la poulie du moteur par exemple, cependant ce type nécessite un joint d'étanchéité tournant (joint rotatif) à la traversée du carter par l'arbre. Ils sont utilisés pour toutes les puissances.

II.4.3 Les compresseurs semi-hermétiques ou semi-ouverts

Il s'agit d'un type intermédiaire entre les précédents types. Le moteur électrique et le compresseur sont montés sur un arbre commun et sur le même bâti avec la possibilité d'accès à chaque élément, ce qui fait que ces compresseurs sont également appelés compresseurs hermétiques « accessibles ». L'accessibilité est réalisée par des plaques boulonnées sur le bâti.

Ce type bénéficie des avantages du groupe ouvert (accès au mécanisme) et du groupe hermétique (pas de garniture d'étanchéité).

II.4.4 Notion de groupe de condensation

Le terme « groupe de condensation » renvoie à l'association d'un moto-compresseur, d'un condenseur et d'une bouteille liquide, initialement, le tout étant monté sur le même bâti. Ce type d'appareil est répandu en froid commercial (chambres froides, vitrine réfrigérée ...).

II.4.5 Choix du compresseur ou du groupe de condensation

Son choix dépend de la puissance frigorifique que nous voulons produire, le dimensionnement courant du compresseur pour une installation de froid alimentaire est naturellement conditionné par :

- la puissance frigorifique à fournir
- le type de fluide réfrigérant;
- la température nécessaire à l'application au niveau de l'évaporateur (froid positif ou négatif, type de denrées à conserver, ...) et ce, dans des conditions optimales;
- la température extrême qu'il peut régner au niveau du condenseur (température de l'air ou de l'eau selon le type de condenseur).

II.5 Les condenseurs à air

Les condenseurs sont des échangeurs thermiques entre le fluide frigorigène et un fluide de refroidissement. Le fluide frigorigène acquiert la chaleur dans l'évaporateur et la cède dans le condenseur. Lors de passage de fluide frigorigène dans le condenseur, il passe de l'état vapeur à l'état liquide.

On distingue deux types de condenseurs à air à savoir:

- les condenseurs à air à convection naturelle
- les condenseurs à air à convection forcée

II.5.1 Les condenseurs à air à convection naturelle

On distingue les condenseurs à tubes lisses et les condenseurs constitués de tubes à ailettes. Le contact de l'air au faisceau à ailettes (ou du faisceau de tubes) s'échauffe et s'élève laissant la place à de l'air plus frais. Ils ne nécessitent aucune énergie pour la circulation de l'air mais le coefficient global d'échange thermique est faible (inférieur à $15 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}^\circ$ et même inférieur à $10 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}^\circ$ pour les condenseurs à tubes lisses). Ils ne sont utilisés que pour des puissances d'échanges très faibles (froid ménager, réfrigérateurs et congélateurs).

II.5.2 Les condenseurs à air à convection forcée

Le coefficient global d'échange des condenseurs à air à convection forcée est compris entre 20 et $30 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}^\circ$, deux types de dispositions sont utilisés à savoir:

- le faisceau vertical

Les condenseurs à air à convection forcée verticaux sont utilisés pour les petites et moyennes puissances, la vapeur surchauffée entre par le collecteur supérieur et le liquide sous-refroidi sort par le collecteur inférieur.

- le faisceau horizontal

Les condenseurs à air à convection forcée horizontaux sont utilisés pour des puissances supérieures, les sections sont disposées en parallèle permettant un meilleur équilibre thermique. La vitesse moyenne de l'air est comprise entre 2 et 4 m/s pour limiter les pertes de charge et le niveau sonore.

II.5.3 Choix du condenseur

L'air ambiant absorbe la chaleur que le condenseur dissipe. L'air a une très faible chaleur massique : $C_{\text{air}} = 1,02 \text{ kJ/kgK}$. (Ou $0,28 \text{ Wh/kg}$), et un très faible coefficient d'échange convectif. Ces deux caractéristiques font que :

- la surface d'échange S du condenseur doit être importante,
- le volume d'air cyclé sur le condenseur doit être important, ceci implique des appareils encombrants équipant seulement les installations ménagères et commerciales, Ce type de condenseur équipant certaines armoires ménagères est constitué d'un serpentin recouvert de treillis de fil métallique soudé ou d'une feuille de tôle ajourée formant des ailettes.

II.6 Les détendeurs

Les détendeurs sont destinés à l'alimentation des évaporateurs en fluide frigorigène. Suivant le principe de fonctionnement des évaporateurs, on distingue:

- les dispositifs alimentant les évaporateurs à détente sèche.

Les détendeurs pour évaporateurs à détente sèche se regroupent en trois types:

- les tubes capillaires ou détendeurs capillaires
- les détendeurs thermostatiques
- les détendeurs électroniques

II.6.1 Les tubes capillaires

Ce sont des tubes de cuivre de longueur variable (de 1 à 7 m environ) et dont le diamètre intérieur varie entre de 0.6 à 2 mm. C'est un diamètre étroit non réglable dont la résistance d'écoulement représente la perte de charge désirée entre le condenseur et l'évaporateur, ses dimensions sont déterminées expérimentalement. Ils conviennent pour des installations de faibles puissances thermiques.

Exemple d'un tube capillaire en cuivre 1/16 en cuivre :



Figure II.4 Modèle d'un tube capillaire 1/16 (1,58mm) de diamètre

II.6.2 Les détendeurs thermostatiques

Ce sont les organes d'alimentation des évaporateurs les plus utilisés. Ils assurent à la sortie de l'évaporateur une surchauffe des vapeurs de fluide frigorigène (FF).

La surchauffe des vapeurs du FF à la sortie de l'évaporateur est la différence entre la température des vapeurs sortant de l'évaporateur et la température d'ébullition du fluide frigorigène (correspondant à la pression d'évaporation) à la sortie de l'évaporateur, on distingue deux types de détendeurs thermostatiques:

- les détendeurs thermostatiques à égalisation de pression interne
- les détendeurs thermostatiques à égalisation de pression externe

II.6.2.1 Les détendeurs thermostatiques à égalisation de pression interne

Ils régulent la surchauffe des vapeurs du FF à la sortie de l'évaporateur en réglant son débit admis à l'évaporateur quelque soit sa charge thermique. La valeur de la surchauffe généralement admise pour assurer un remplissage correct de l'évaporateur et la protection du compresseur (vapeurs surchauffées) est comprise entre 4 et 8°C.

Le détendeur thermostatique à égalisation de pression interne comprend le corps du détendeur dans lequel sont renfermés :

- le filtre à tamis placé à l'entrée (arrivée du FF dans le détendeur)
- la membrane (soufflet) qui est solidaire d'un pointeau et d'un ressort de réglage muni d'une vis de réglage accessible.
- le bulbe situé à la sortie de l'évaporateur et solidaire de la tuyauterie, il mesure la température du (FF) à la sortie de l'évaporateur, sa fixation doit être solide et sa position doit suivre certaines règles (ne pas être positionné en bas de tuyauterie).
- le tube capillaire qui transmet la mesure du bulbe au corps du détendeur, l'ensemble tube capillaire et bulbe est appelé train thermostatique. Le fonctionnement de ce détendeur résulte de l'équilibre des forces qui sont :
- la pression du fluide contenue dans le train thermostatique (force descendante sur la membrane)
- la pression d'évaporation dans l'évaporateur (force ascendante sur la membrane)
- la pression exercée par le ressort de réglage (force ascendante sur la membrane).

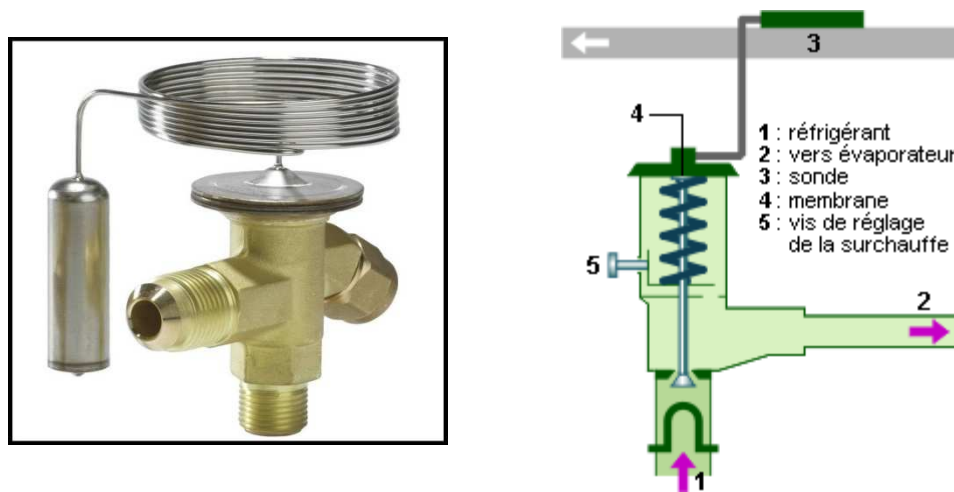


Figure II.5 Détendeur thermostatique à égalisation de pression interne.

A partir d'une position précise du pointeau, on limite le débit de FF entrée dans l'évaporateur pour quelle soit complètement évaporée :

- lorsque la charge thermique augmente au niveau de l'évaporateur, la zone de surchauffe augmente puisque le FF liquide s'évapore plus rapidement ce qui va exercer une pression sur la membrane (force descendante) ce qui provoque la descente du pointeau autorisant ainsi l'alimentation de l'évaporateur en FF liquide, de même lorsque la charge thermique baisse, la zone de surchauffe diminue, la pression exercée sur la membrane (descendante) baisse, ce qui entraîne une montée du pointeau provoquant une réduction de son alimentation en fluide frigorigène liquide.

II.6.2.2 Les détendeurs thermostatiques à égalisation de pression externe

Lorsque les pertes de charges de l'évaporateur sont élevées, le détendeur thermostatique à égalisation de pression interne ne peut plus bien régler la surchauffe des vapeurs à la sortie de l'évaporateur, (surchauffe élevée), on utilise alors des détendeurs thermostatiques à égalisation de pression externe (DTEPE). Pour ce type de détendeur, ce n'est plus la pression régnant à l'entrée de l'évaporateur qui appuie sur la membrane mais plutôt la pression disponible à la sortie de l'évaporateur pour aboutir à l'équilibre des forces agissant sous le pointeau. Du point de vue de la constitution, ce détendeur est similaire au détendeur à égalisation de pression interne avec en plus un piquage réalisé entre la sortie de l'évaporateur et le détendeur, il s'agit du tube à égalisation de pression externe.

À l'aide de cette technique, l'effet des pertes de charges élevées de l'évaporateur est éliminé.

Certains évaporateurs de puissances relativement élevées sont scindés par les fabricants en plusieurs sections (circuits) parallèles et leur alimentation en FF est généralement réalisée par des DTEPE. Dans ce cas de figure, la répartition du FF entre les différentes sections (circuits) se fait grâce à un distributeur de liquide.

II.6.2.3 Les détendeurs électroniques

Il s'agit de dispositifs qui régulent la différence de température de FF à l'entrée et la sortie de l'évaporateur en réglant le débit de FF en fonction de sa charge thermique. Un détendeur électronique comporte trois parties principales:

- un régulateur
- une électrovanne (vanne électromagnétique ou commandée par un servomoteur)
- des sondes de températures (ou capteurs de température).

L'électrovanne est placée juste à l'entrée de l'évaporateur et elle est commandée par le régulateur (calculateur) en fonction:

- des écarts de températures mesurées par les sondes de températures placées sur les tuyauteries de l'évaporateur à l'entrée et à la sortie.
- de la valeur de consigne pré-réglée (température de consigne)
- de la température du milieu à refroidir mesurée par une sonde

Le détendeur électronique permet des économies d'énergie électrique sur la consommation du compresseur avec un remplissage optimal de l'évaporateur et le maintien d'une surchauffe minimale stable.

II.6.3 Choix du détendeur thermostatique

La sélection pratique d'un détendeur dépend de volume et de la puissance frigorifique que nous voulons produire en se référant aux catalogues des constructeurs. Un détendeur se sélectionne en fonction de sa capacité nominale (puissance frigorifique) aux conditions nominales, c'est-à-dire pour une température d'évaporation donnée, une température donnée du (FF) à l'entrée du détendeur et une certaine chute de pression entre l'amont et l'aval du détendeur.

Les conditions de fonctionnement étant en général différentes des conditions nominales, des corrections s'imposent. En désignant par Q_o la puissance frigorifique nécessaire, et par Q_n la capacité nominale du détendeur thermostatique à sélectionner, s'écrit:

$$Q_n = K_{\Delta p} * K_t * Q_o \quad (\text{II.1})$$

Q_n : Capacité nominale du détendeur.

$K_{\Delta p}$: Facteur de correction pour différentes chutes de pression

K_t : Facteur de correction pour différentes températures d'évaporation et d'entrée du liquide audétendeur

Q_o : Puissance frigorifique nécessaire

Les différents facteurs de correction sont donnés dans les catalogues constructeurs.

Le catalogue en notre possession nous a permet de choisir un détendeur en fonction de sa capacité nominale Q_n à 100% d'ouverture et pas en fonctionde ces coefficients de correction.

II.7 Le réservoir de liquide

Il est placé à la sortie du condenseur et sert à stocker le FF liquide à la mise en arrêt de l'appareilou lors des opérations de maintenance. Il joue également un rôle important dans la régulation dusystème frigorifique lorsque les variations de charges thermiques sont importantes.Le réservoir de liquide appelé aussi bouteille liquide, bouteille accumulatrice ou « receiver »peut être quelque fois dimensionnée pour stocker toute la charge du FF de l'installation etson utilisation est préconiséepour les installations frigorifiques ; dans le cas de grandesinstallations avec condenseurs à air, il est fortement recommandé de le placer dans le circuitfrigorifique.

Il est le plus souvent formé d'une virole en acier de forte épaisseur fermée à ses deux extrémitéspar des fonds bombés et des vannes d'arrivées (liaison vers le condenseur) et de départ (liaisonvers le détendeur).



Figure II.6 Un bouteille de réservoir de fluide frigorigène condensé

II.8 La bouteille anti-coup de liquide

Elle est placée entre l'évaporateur et le compresseur (à proximité du compresseur) et son rôle est d'éviter l'aspiration éventuelle du FF 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 FF. Son utilisation est obligatoire pour les installations en régime noyé (évaporateurs noyés) et est conseillée pour les autres installations (évaporateurs à détente sèche). Le liquide se sépare de la vapeur par une brusque réduction de la vitesse du FF consécutive à une augmentation de la section de passage de vapeurs. Le FF liquide est recueilli au fond de la bouteille et la vapeur est aspirée à la partie supérieure de la bouteille par le compresseur. Le retour d'huile est assuré par un orifice calibré à la partie inférieure de la vanne d'aspiration.



Figure II.7 Bouteille anti-coups de liquide frigorigène.

II.9 Le séparateur d'huile

Il est placé juste après le compresseur et permet de recueillir les gouttelettes d'huile entraînées par les vapeurs du FF comprimés, et d'évaporer le FF éventuellement présent et de renvoyer l'huile au niveau du carter du compresseur. Son utilisation est obligatoire pour les installations où le FF est non miscible avec l'huile (par exemple le R717). Il est également présent dans les installations de grande puissance même avec des FF miscibles avec l'huile. Dans le séparateur liquide, la réduction brutale de la vitesse des vapeurs de FF permet de piéger l'huile dans le réservoir du séparateur qui sera ensuite renvoyée vers le compresseur.

II.10 Le filtre déshydrateur

Il convient de distinguer:

- le filtre qui sert à piéger les impuretés contenues dans le circuit frigorifique
- le déshydrateur qui permet l'absorption de l'humidité contenue dans le circuit frigorifique

- le filtre déshydrateur qui réunit dans le même appareil les fonctions de filtre et de déshydrateur.

Les filtres destinés au FF sont les filtres à toile métallique à mailles très serrées en bronze, en laiton ou en acier inoxydable, le filtre est caractérisé par sa surface filtrante et par la chute de pression correspondante au passage d'un débit donné de fluide propre, traversant le fluide non colmaté. Lorsqu'il se colmate, la chute de pression augmente, le filtre doit alors être remplacé.

Les filtres du FF se retrouvent à l'entrée des compresseurs (généralement intégrés aux compresseurs), en amont des pompes de circulation du FF, des pompes à huile et à l'entrée des organes d'alimentation des évaporateurs (détendeurs).

Le déshydrateur maintient à un niveau acceptable la teneur en eau du FF contenu dans un circuit frigorifique. La concentration maximale en eau soluble dans les FF décroît par baisse de la température et varie suivant le FF ; Au-delà de cette concentration, l'humidité excédentaire peut se trouver en fonction des températures dans le circuit frigorifique à l'état vapeur, à l'état liquide ou être prise en glace.



Figure II.8 Modèle d'un filtre déshydrateur 12 µ.

II.11 Les voyants

On distingue parmi les voyants :

- les voyants simples
- les voyants indicateurs d'humidité

Le voyant simple (verre épais serti dans une embase métallique) est un organe placé juste avant le détendeur et après le filtre déshydrateur. Il permet de contrôler la présence éventuelle de bulles de FF à l'état vapeur, indice d'anomalie (charge insuffisante en FF, filtre déshydrateur bouché, SR insuffisant...).

Le voyant indicateur d'humidité est un voyant simple permettant l'indication de l'état de saturation (humidité) du circuit frigorifique. Il s'agit d'un voyant avec une couronne indicatrice (sel chimique) qui change de couleur en fonction de la quantité d'eau contenue dans le FF. Le vert indique généralement un circuit sec (parfaitement déshydraté) et le jaune un circuit humide; le vert clair indique que le filtre déshydrateur est en train de se saturer.



Figure II.9 Modèle d'un voyant de fluide frigorigène avec indicateur d'humidité

II.12 Amortisseur des vibrations

Il permet de réduire les vibrations transmises au circuit frigorifique par une machine en mouvement (le compresseur) et d'absorber les tensions dues aux dilatations et aux contractions des conduites. 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 fabriqué en inox ou en cuivre et revêtu d'une tresse enfil d'acier galvanisé ou en cuivre.

II.13 L'électrovanne

Aussi appelé vanne électromagnétique ou vanne solénoïde, elle permet d'ouvrir ou de fermer le circuit frigorifique. Elle est commandée électriquement en alimentant une bobine en fil cuivré produisant un champ magnétique (utilisation de l'effet électromagnétique du courant électrique). Elle est généralement placée sur les conduites de FF liquides. Une utilisation courante est son installation au milieu d'une ligne transportant du FF liquide en amont du détendeur, son rôle est alors d'éviter la migration du FF liquide vers l'évaporateur à l'arrêt du compresseur. Les électrovannes généralement utilisées sont du type NF (normalement fermé) mais il peut arriver que pour certaines applications, elles soient du type NO (normalement ouvert).

II.14 Les dimensions des tubes utilisés dans le domaine du froid :

Dans le domaine du froid on utilise les raccords en tuyaux de cuivre, on a choisi la matière des tubes en cuivre pour sa rigidité et son inoxydabilité, sa couleur extérieure

Change en contact avec l'air et devient brun, ses différentes dimensions sont mentionnées dans le tableau de dessous :

Tableau II.1 Tableau des différents diamètres des tubes en cuivre utilisés dans le domaine du froid.

<i>Diamètre ext</i>		<i>Epaisseur</i>		<i>Poid</i>	
<i>inch</i>	<i>mm</i>	<i>inch</i>	<i>mm</i>	<i>15m/spire</i>	<i>50'/spire</i>
1/16"	1.59	0.028"	0.71	0.26	0.264
1/8"	3.18	0.030"	0.76	0.71	0.72
5/32"	3.96	0.030"	0.76	1.02	1.04
3/16"	4.76	0.030"	0.76	1.28	1.30
1/4"	6.35	0.030"	0.76	1.78	1.81
5/16"	7.94	0.032"	0.81	2.43	2.47
3/8"	9.52	0.032"	0.81	2.97	3.02
1/2"	12.7	0.032"	0.81	4.04	4.10
5/8"	15.87	0.035"	0.89	5.6	5.70
3/4"	19.05	0.035"	0.89	6.79	6.90
7/8"	22.23	0.045"	1.14	10.1	10.26

II.15 Conclusion

D'une manière générale, un système de réfrigération est constitué par l'association de différents organes mécaniques et électriques, dont l'évaporateur, le détendeur, le compresseur, le condenseur, le moteur, et autres éléments de différentes dimensions, selon la capacité et la puissance de la machine frigorifique à concevoir; la machine frigorifique a pour rôle des différents changements d'état du fluide frigorigène à travers les différentes phases du circuit frigorifique ; l'évaporateur a pour effet d'absorber la chaleur contenue dans le milieu à refroidir, et de la rejeter au condenseur.

III.1 Introduction

Afin d'aboutir à réaliser notre idée pratiquement, qu'est la réalisation d'un prototype d'une machine produisant du froid, alimentée en 12 volt, vu la non disponibilité des compresseur fonctionnant à 12 volt sur marché, pour cela, nous nous sommes obligé de porter des modifications au compresseur existant en récupérant uniquement la partie compresseur (le cylindre, le vilebrequin, le piston et le clapet) en le reliant directement à l'arbre de rotation d'un moteur asynchrone fonctionnant sous une tension d'alimentation de 12 Volt continue.

Le compresseur que nous avons utilisé dans notre réalisation pratique est l'organe le plus compliqué et le plus délicat car ses organes sont sans cesse en mouvement nécessitant un system de lubrification permanent, et ayant pour rôle, d'augmenter la pression et de faire circuler le fluide frigorigène.

Le rôle du compresseur :

- Il aspire les vapeurs produites par l'évaporation du fluide dans l'évaporateur.
- Il comprime les vapeurs et les refoule à haute température vers le condenseur.

III.2 Les différents composants de la machine

Notre machine frigorifique se compose de deux parties distinctes, la partie frigorifique et la partie électrique.

a. La partie frigorifique

Le circuit frigorifique comporte quatre éléments essentiels, le compresseur, le condenseur, le détendeur, l'évaporateur, et les différents éléments complétant notre installation.

III.2.1 Compresseur

Le compresseur aspire le gaz à basse pression et à basse température, l'énergie mécanique du compresseur va permettre une élévation de la pression et de la température.

On a apporté une modification à un compresseur hermétique de marque "ZMC", référencé *GL45AA*, dont ses propriétés sont :

* ϕ 1/4 tube d'aspiration, ϕ 3/16 tube de refoulement,

* Plage de température : -35°C / - 10°C,

* Moteur RSIR: faible couple de démarrage,

*Huile ISO VG46 Ester, Compresseur monophasé, 220V-240V / 50 Hz

Les caractéristiques techniques sont montrées dans le tableau ci-dessous:

Tableau III.1 Fiche signalétique du compresseur hermétique ZMC GL45AA [10].

Température d'évaporation [c°]	-25
Puissance frigorifique [w] Q	82
COP	0,82
Puissance électrique [w]	100
courant [A]	0,69

III.2.1.1 Les modifications apportées au compresseur ZMC GL45AA :

On a ôté le couvercle soudé pour retirer le bloc interne qui contient les différents organes montrés sur la figure ci-dessous :

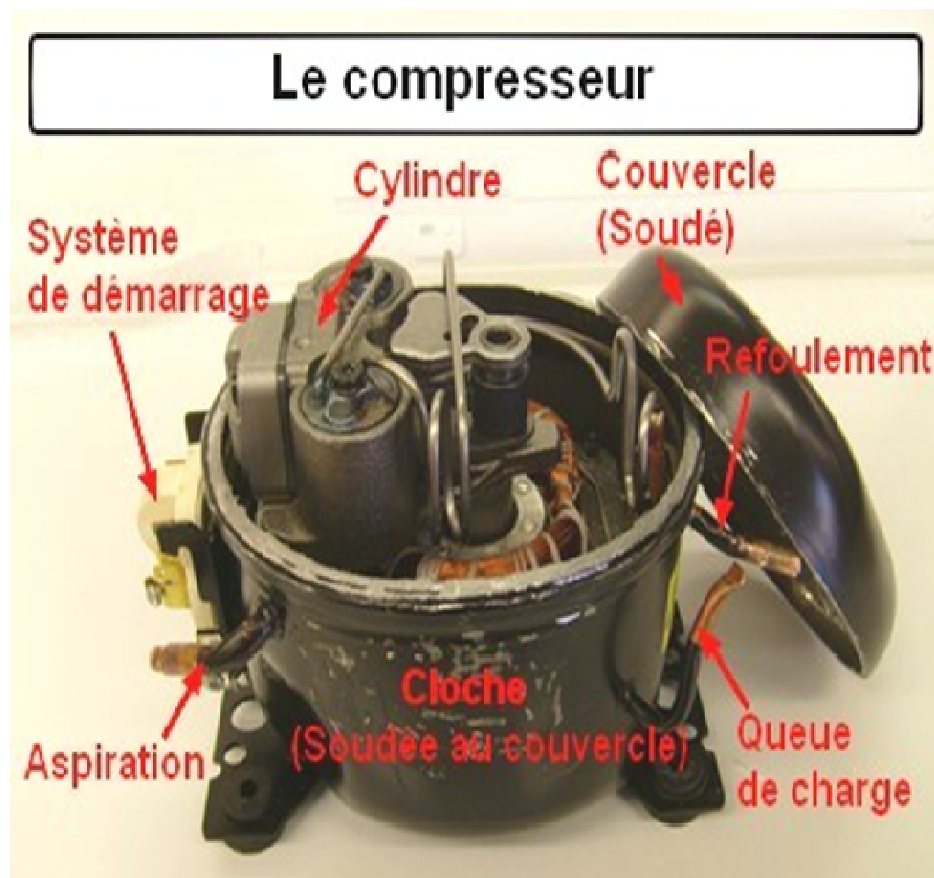


Figure III.1 Vue interne d'un compresseur hermétique.

-Vue éclatée du compresseur :

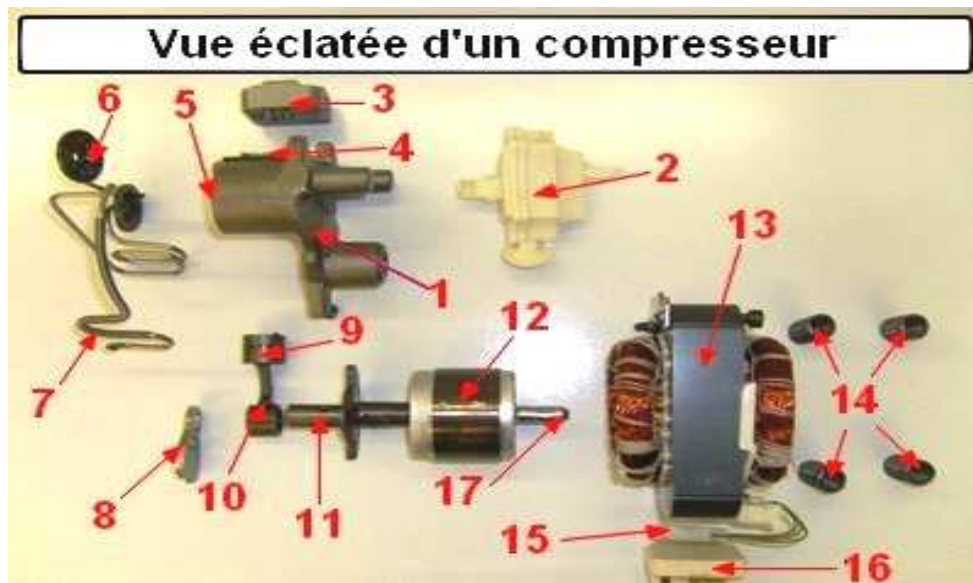


Figure III.2 Vue éclatée d'un compresseur hermétique.

Légende:

- 1- Cylindre (Bloc métallique)
- 2- Guide d'aspiration (Oriente le gaz vers la chambre du cylindre)
- 3- Culasse (Assure l'étanchéité entre cylindre et clapets)
- 4- Clapets (Permettent l'aspiration et le refoulement)
- 5- Silencieux (Atténuent le sifflement du gaz pendant les phases de refoulement)
- 6- Couvercle de silencieux (Assurent l'étanchéité entre silencieux et tuyau de refoulement)
- 7- Tuyau de refoulement (Assure l'étanchéité du refoulement vers le circuit réfrigérant)
- 8- Contrepoids (Equilibre la force rotative du vilebrequin)
- 9- Piston (Assure la compression du gaz)
- 10- Bielle (Assure l'intermédiaire entre piston et vilebrequin)
- 11- Vilebrequin (Permet la transmission désaxée entre rotor et piston)
- 12- Rotor (Crée l'énergie rotative)
- 13- Stator (Crée le champ magnétique)
- 14- Ressort de suspension (Equilibre et stabilise le moteur dans la cloche)
- 15- Connectique moteur (Assure l'apport du courant dans le moteur)
- 16- Système de démarrage (ici CTP ; coefficient de température positive)
- 17- Pompe à huile (Lubrifie la mécanique du montage)

Après le désassemblage complet du compresseur, on a récupéré uniquement les éléments qui seront utiles dans notre prochain montage, contenant les éléments suivants :

- Le bloc-cylindre comportant les organes suivants: piston, cylindre, clapets, bielle système de rotation mécanique.

Le tableau suivant montre l'état avant et après le remontage des éléments constituant le nouveau compresseur hermétique semi-ouvert :

Tableau III.2 Les propriétés du bloc compresseur avant et après la modification

Eléments	Avant	Après	Remarques
Tubede refoulement	Φ 1/8 (3.175mm)	3/16 (4,76mm)	Augmentation de débit à la sortie du compresseur
Rainure duPiston	0	2x2 mm ²	Alésage lisse
Trous de refoulement	2 mm	3,2mm	Perçage 3,2mm
Diamètre d'arbre côté Orifice d'aspiration d'huile	11,5 mm	11 mm	Alésage à 0,5mm

Tableau III.3 Les modifications apportées sur les organes du compresseur.

N°	Type de pièce	Caractéristique géométrique en (mm)	Matière de fabrication
1	Piston	Diamètre : 16.98 Longueur : 18.40	acier
2	Bielle	Diamètre : 14 Longueur : 28	acier
3	Vilebrequin	décalage d'axe à 12 mm	acier
4	Arbre principal	Diamètre : 11,5	acier
5	Manchon cylindrique	Diamètre extérieur : 20 Diamètre intérieur : 11	acier
6	Chemise à piston	Diamètre : 17 Longueur : 38	acier

Quelques photos montrant les pièces après la modification :

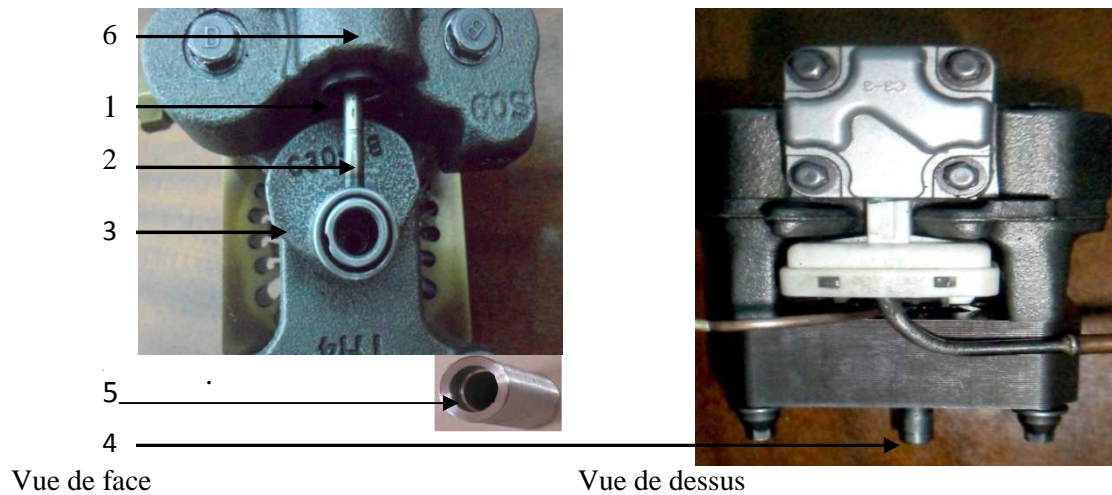


Figure III.3 Image représentant le bloc cylindré

III.2.1.2 Le condenseur:

Les gaz chauds à haute pression et haute température venant du compresseur se dirigent vers le condenseur, qui est un échangeur qui va permettre aux gaz de se condenser par échange avec un fluide extérieur (l'air..) à température et pression constante, c'est la phase de condensation, la vapeur se transforme en liquide.

Pour notre installation on a utilisé un condenseur d'un réfrigérateur 300D dont les caractéristiques sont mentionnées dans le tableau suivant [10]:

Tableau III.3 Propriétés du condenseur utilisé dans le prototype [10].

Elément	Diamètre	Matière	Longueur (m)	Surface (m ²)
tube	3/16 (4,76mm)	Acier	10,4	-
Condenseur	3/16 (4,76mm)	Acier	-	0,405



Figure III.4 Le condenseur utilisé dans l'installation [10].

III.2.1.3 Le détendeur:

Le liquide formé dans le condenseur est détendu par abaissement brusque de la pression au passage du détendeur.

Les propriétés du filtre déshydrateur 15g sont indiquées sur la figure ci-dessous :



Figure III.5 Filtre déshydrateur 15 g.

III.2.1.4 L'évaporateur:

L'évaporateur est lui aussi un échangeur de chaleur, le fluide liquide provenant du détendeur va entrer en ébullition dans l'évaporateur en absorbant de la chaleur du fluide extérieur, c'est la phase d'évaporation. Le gaz est ensuite aspiré par le compresseur pour un nouveau cycle.

L'image de l'évaporateur utilisé pour le prototype :



Figure III.6 Évaporateur de type Réf. ECOCLIM : 294C68.

Dans le tableau suivant, on montre les caractéristiques de l'évaporateur :

Tableau III.4 Caractéristique de l'évaporateur Réf. ECOCLIM : 294C68

Type d'évaporateur	Matière	Diamètre de tube mm	qualité	Poids [kg]	Surface d'échange m ²
<i>ECOCLIM</i> : 294C68	Cuivre	9,5	bon	0.750	0,06

III.3. Schéma simplifié de la partie frigorifique

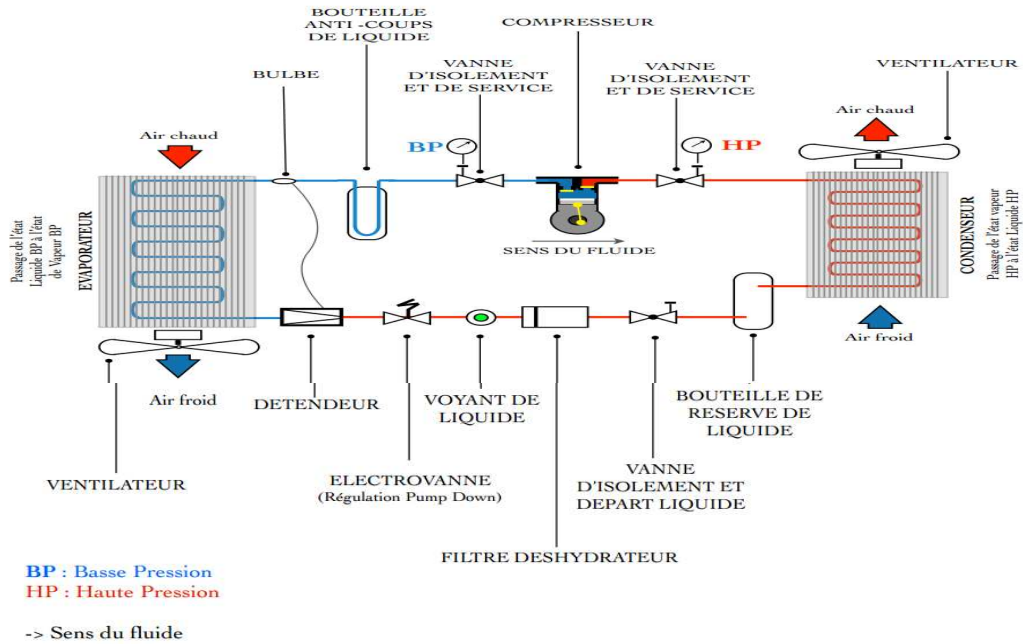


Figure III.7 Schéma détaillé de circuit frigorifique.

Les états successifs du fluide frigorigène :

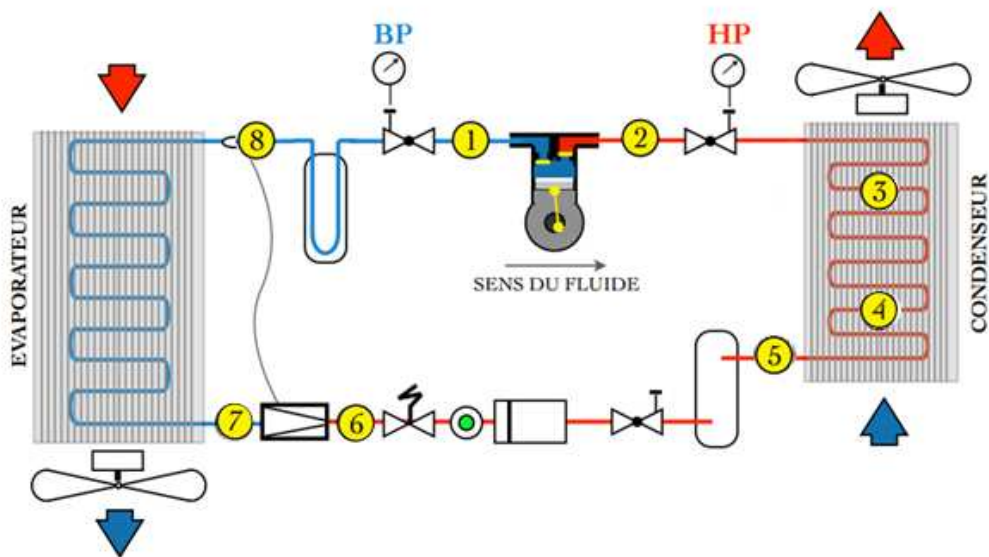


Figure III.8 Sens et états de fluide frigorigène dans le circuit frigorifique.

1. Entrée du gaz à BP au compresseur (état de fluide : vapeur BP).
2. Sortie du gaz à HP du compresseur (état de fluide : vapeur HP).
- Zone de désurchauffe de 2 vers 3 (Etat de fluide : vapeur HP).

-Zone de condensation de 3 vers 4 (Etat de fluide passage de l'état vapeur a l'état liquide HP).

5. Sortie de condenseur vers le réservoir de liquide (Etat fluide : liquide HP).

6. Température entrée détenteur (Etat fluide : liquide HP).

7. Température sortie détenteur (Etat fluide : liquide BP).

-Zone d'évaporation de 7 vers 8 (Etat de fluide : passage de l'état liquide a l'état vapeur BP).

8. Température sortie d'évaporateur vers anti-coup (Etat de fluide : vapeur BP).

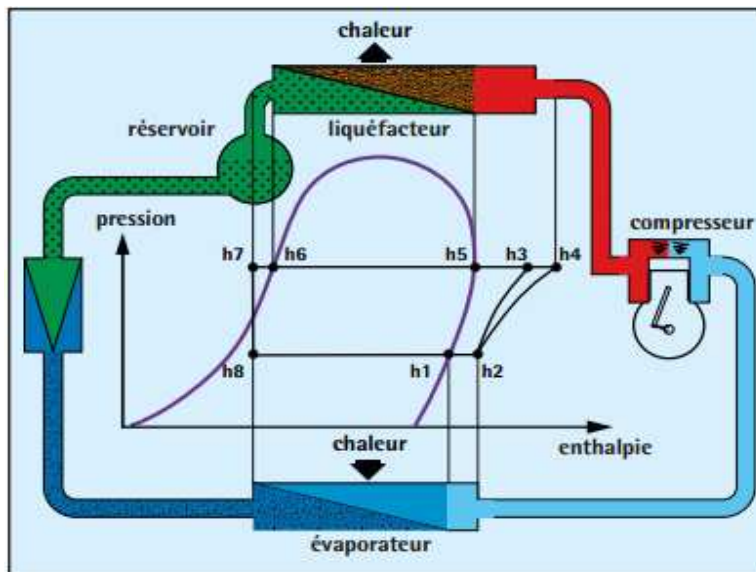


Figure III.9 Diagramme (P,h) de différentes étapes d'un cycle frigorifique

III.4 Grandeur caractéristique

III.4.1 Grandeurs géométriques

III.4.1.1 Cylindrée C : C'est le volume balayé lors d'une course d'aspiration pendant un tour de l'arbre.

$$C = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot n [m^3] \text{ (III.1)}$$

l : course [m].

n : nombre des cylindres ; dans notre cas n=1.

d : Alésage du cylindre en [m].

III.4.1.2 Débit volumique balayé : C'est le volume balayé pendant l'unité du temps, il varie proportionnellement à la vitesse de rotation du compresseur.

$$\dot{V}_{bal} = \left(\frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot n \right) \cdot \frac{N}{60} \quad [m^3/s] \quad (III.2)$$

N : vitesse de rotation [tr/min].

La cylindrée est seule une grandeur purement géométrique

$$\frac{V_{bal.1}}{N_1} = \frac{V_{bal.2}}{N_2} \quad (III.3)$$

Le débit volume balayé est souvent exprimé en m³/h

III.4.1.3 Débit volumique aspiré : C'est le débit réellement aspiré par le compresseur

$$V_{asp} = V_{bal} \cdot \eta_V \quad (III.4)$$

η_V : Rendement volumique correspond au volume aspire horaire sur volume balayé horaire.

$$\eta_V = \frac{V_{asp}}{V_{bal}} = \frac{c \cdot u}{l} = \frac{c \cdot u}{c \cdot u + c \cdot n} \quad (III.5)$$

V_{asp} : Volume aspiré.

V_{bal} : Volume balayé par la cylindrée

$c \cdot u$: Course utile.

$c \cdot n$: Course nuisible

III.4.1.4 Débit massique : C'est le nombre de kilogrammes de fluide ayant circulé dans le compresseur pendant une unité de temps.

$$m_f = \frac{\dot{V}_{asp}}{V''_{asp}} \quad [kg/s] \quad (III.6)$$

V''_{asp} : Volume massique du fluide à l'aspiration en kg/s

III.4.2 Mouvement du piston :

Son mouvement permanent avec la présence des clapés, produit la différence de pression entre le tube de grand diamètre, c'est l'aspiration et le tube petit diamètre, représente le refoulement. Et son Principe de fonctionnement est sur la (figureIII.10) :

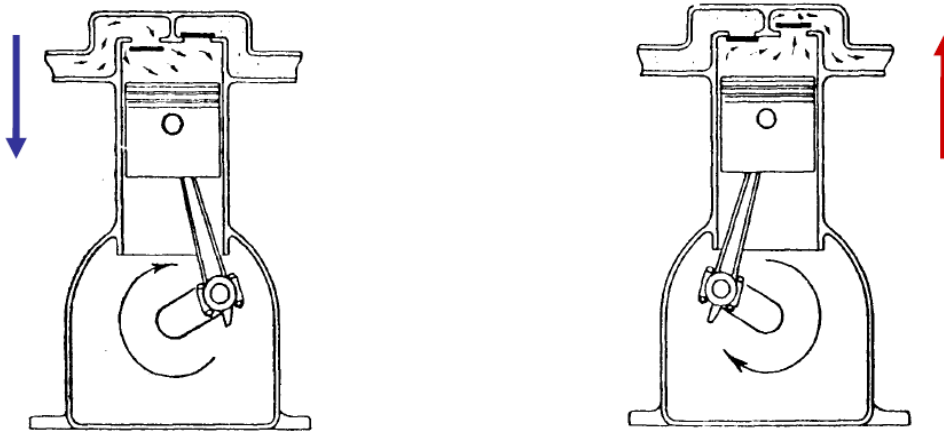


Figure III.10 Schéma représente le mouvement de piston dans la chemise

III.5 Les différents composants de la machine frigorifique 12volt (Partie électrique)

III.5.1 Moteur asynchrone 12vDC :

III.5.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose :

D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil constituant le rotor du moteur. L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux).

D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite.



Figure III.11 Moteur asynchrone 12volt, 1450 tr/min.

III.5.2 Pompe à l'huile électrique

La pompe à l'huile est un dispositif permettant la lubrification du moteur. La pompe utilisée dans notre installation est électrique alimentée par une tension d'alimentation de 12V continue.



Figure III.12 Pompe à huile spéciale 12v DC.

III.5.3 Ventilateur hélicoïdal de refroidissement :

C'est un ventilateur servant à faire circuler de l'air ambiant à travers des différents composants constituant notre machine frigorifique qui permettra d'évacuer la chaleur produite pendant le fonctionnement.



Figure III.13 Ventilateur de refroidissement 12V DC.

III.5.4 Ventilateur tangentiel pour l'évaporateur

Caractéristiques techniques

- Sortie d'air 112 x 38 mm
- Cylindre des ventilateurs : Ø 60 mm

Tableau III.5 Fiche signalétique du ventilateur tangentiel.

Catégorie	ventilateur à courant transversal
Tension nominale	12 V
Débit d'air	70 m ³ /h
Modèle (Ventil. à courant transversal)	moteur à droite
Bruit généré (max.)	47 dB
Longueur	11 cm
Hauteur	7 cm
Tours/min.	1 000 tr/min
Larg.	11 cm

**Figure III.14** Ventilateur tangentiel 12 v DC.

III.5.5 Carte électronique de commande :

C'est un dispositif électronique qui gère les différents organes électriques de la machine frigorifique, Cette dernière est équipée d'un thermostat avec deux sondes, mesurant la température extérieur et la température de l'aire aspiré de l'évaporateur.

**Figure III.15.** Carte électronique universelle U05PG.

III.6 Evaluation des caractéristiques principales du prototype réalisé

Dans cette partie, nous résumons les résultats de calcul obtenus pour la partie frigorifique ainsi que pour la partie électrique :

A- Partie frigorifique :

Données imposées

- Température ambiante extérieure: +25°C
- Δt évaporateur: 10 K
- Δt condenseur: 10 K
- Fluide: R 134a
- Compresseur: ZMC GL45AA1450 tr/mn
- Alésage: 17 mm
- Course: 19.21mm
- Nombre de cylindre: 1
- Surchauffe aspiration: 5°C
- Sous refroidissement: 5°C
- Lecture sur le diagramme de R134a, les enthalpies suivant :

$$h_1 = 375 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 430 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 200 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 200 \text{ kJ/kg}$$

Calculs et solutions

a- Cylindrée $C = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot n$

➤ Diamètre du piston = 17 mm

➤ La course du piston $l=19.21\text{mm}$

➤ Nombre du piston $n=1$

AN :

$$C = \frac{\pi \cdot 17^2}{4} \times 19,21 \times 1 \times 10^{-3} = 4,36 \text{ cm}^3 .$$

b- Volume balayé horaire:

$$\dot{V}_{bal} = C \times N \times 60 \times 10^{-6}$$

$$\dot{V}_{bal} = 4.36 \times 1450 \times 60 \times 10^{-6} = 0.38 \text{ m}^3 / \text{h}$$

c- Taux de compression:

$$\pi = \frac{P_{cond}}{P_{eva}}$$

$$\pi = \frac{4.8}{0.5} = 9.6$$

d- Rendement volumétrique:

$$\eta_v = 1 - (0.05 \times \pi)$$

$$\eta_v = 1 - (0.05 \times 9.6) = 0.52$$

e- Volume aspiré horaire:

$$\eta_v = \frac{V_{asp}}{V_{bal}}$$

$$V_{asp} = \eta_v \times V_{bal}$$

$$V_{asp} = 0.52 \times 0.38 = 0.1976 \text{ m}^3/\text{s}$$

f- Masse aspirée horaire:

$$\text{Volume massique} = v' = 0,4 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Masse volumique} = \rho = \frac{1}{v'} = \frac{1}{0.4} = 2.5 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{asp} = V_{asp} \times \text{masse volumique} :$$

$$M_{asp} = 0,1976 \times 2.5 = 0.494 \text{ kg/h}$$

g- Puissance frigorifique:

Débit masse :

$$q_m = \frac{V_{asp}}{v'}$$

$$q_m = \frac{0.1976}{0.4} = 0.494 \text{ kg/h}$$

$$\varphi_0 = 0.494 \times (375 - 200) = 86.45 \text{ kj/h}$$

B- Partie électrique :

Le dimensionnement de notre installation du circuit frigorifique nous a permis d'avoir la puissance électrique dont l'installation a besoin pour fonctionner correctement et d'une façon optimale. Cette puissance est composée de :

- la puissance consommée par le ventilateur de l'évaporateur = 7 W

- la puissance consommée par le ventilateur de refroidissement de moto-compresseur = 2 w
- la puissance consommée par le moteur asynchrone = 96 W
- la puissance consommée par la pompe a huile électrique = 5w
- la puissance consommée par la carte électronique de commande = 3w

Ces puissances électriques ne seront pas consommées en même temps car les moteurs ne fonctionnent pas en permanence. Ainsi la puissance électrique maximale que l'installation peut consommée est de $P = 113$ Watt.

Etant donné que la puissance électrique maximale de notre installation est connue, on est en mesure d'entamer le dimensionnement des panneaux photovoltaïques nécessaire à son fonctionnement. Le nombre de panneaux photovoltaïque à installer est déterminé et fait l'objet du chapitre quatre.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré les composants constituant notre nouvelle machine frigorifique ainsi que leur dimensionnement et le calcul des puissances consommées par chaque élément de la partie électrique ainsi la puissance totale consommée.

IV.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot " photovoltaïque " vient de la langue grec " photo " qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 - 1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque (PV) signifie littérairement la << lumière électricité >>.

Avant d'entrer dans les détails du modèle PV, certains principes de base méritent d'être rappelés, notamment la définition de plusieurs variables qui seront mentionnées à plusieurs reprises par la suite.

VI.2 Rayonnement solaire :

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10^6 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie.

Cette quantité d'énergie quittera sa source sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur d'onde variant de 0.22 à $10 \mu m$ [4], l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit [15]:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu m$).
- 47 % dans la bande visibles (0.4 à $0.8 \mu m$).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu m$).

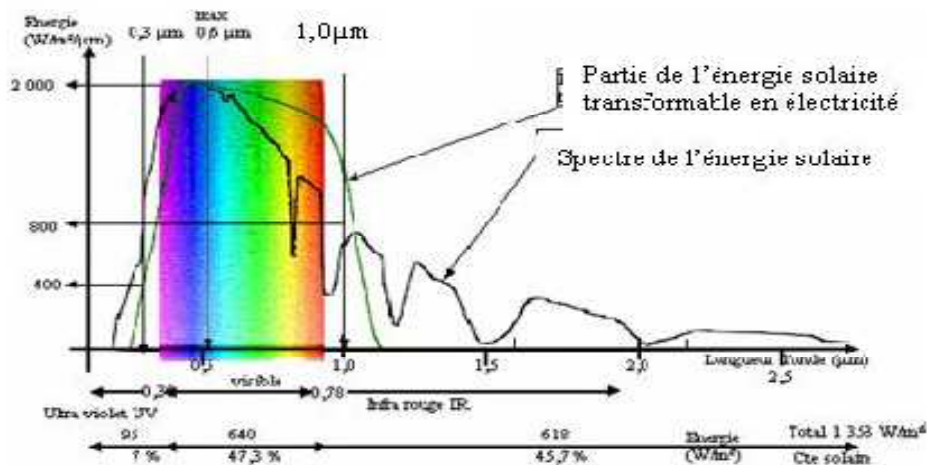


Figure IV.1 Analyse spectrale du rayonnement global solaire [16]

Au cours de ces dix dernières années ce spectre à été homologué par l'organisation internationale de standardisation (ISO 9845-1 :1992) et la société américaine de test et de matériaux (ASTM E 892-87 :1992) a fixé le flux de standardisation à 1000 W/m^2 .

Cette énergie est définie comme un paramètre solaire qui a une valeur variable suivant la saison, l'heure, et la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité, ...etc.).

VI.3 Principe de calcul de l'énergie solaire

La terre reçoit quotidiennement un flux important d'énergie solaire. La puissance de ce rayonnement est fonction de plusieurs critères; conditions météorologiques, situation géographique et jour de l'année.

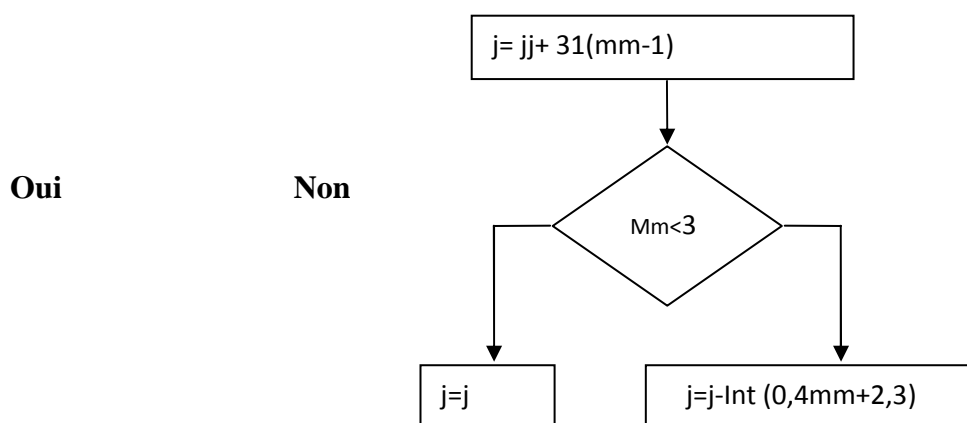
IV.3.1 La déclinaison

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre [13], sa valeur en degré est donnée par la relation de *Cooper* suivante :

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360}{365}(j - 81)\right) \quad (\text{IV.1})$$

Où j : est le numéro d'ordre du jour de l'année ($j=1$ pour le 1er Janvier, $j=32$ pour le 1er Février, ...etc.)

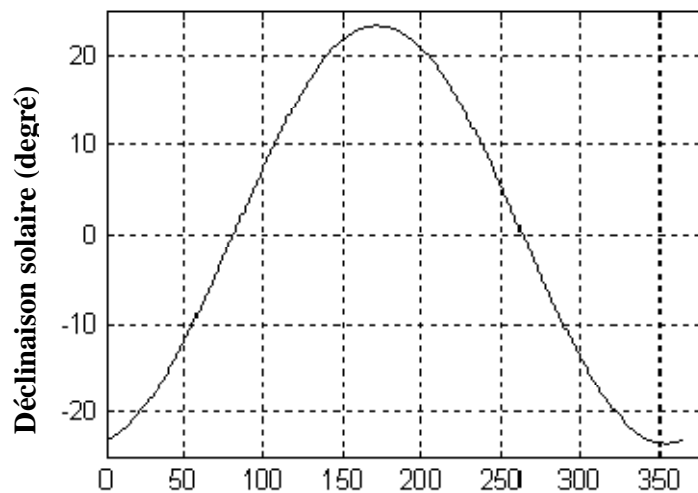
L'organigramme donné dans la (figure IV.2) permet de calculer le numéro j du jour à partir de la date écrite sous la forme $jj.mm$.



La fonction « int » consiste à prendre la partie entière de la valeur du terme entre les parenthèses

Figure IV.2 Organigramme calculant le numéro du jour de l'année.

La déclinaison varie entre $-23,45^\circ$ le 21 décembre et $+23,45^\circ$ le 21 juin.



Journées (j)

Figure IV.3 Courbe de déclinaison du soleil

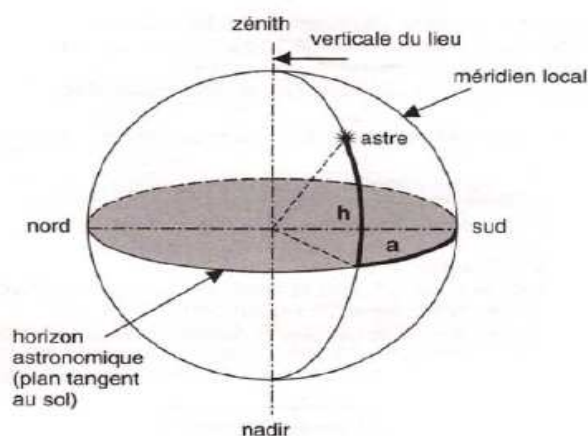
IV.3.2 Les angles de repérage du soleil

Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles représentés sur la (figure IV.4) à savoir l'azimut (**a**) et la hauteur (**h**).

L'azimut représente l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.

La hauteur est l'angle que fait la direction du Soleil avec sa projection sur un plan horizontal.

Ces deux angles sont fonctions de la latitude L du lieu, la date j (numéro du jour de l'année) et de l'heure solaire TS dans la journée.



Hauteur h et azimut a , définies sur la sphère céleste

Figure IV.4 Cordonnées horizontales (ou locales) d'un astre .

La latitude φ et la date j servent à déterminer la trajectoire du Soleil dans le ciel et l'heure TS donne sa position instantanée sur cette trajectoire. On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même, Un jour a été divisé en 24h et on a défini l'heure solaire TS en fixant $TS = 12h$ lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son zénith).

L'angle horaire ω , la hauteur h du Soleil et l'azimut a se définissent par les relations ci-dessous:

$$\omega = (TSV - 12) \cdot 15 \quad (IV.2)$$

Avec TSV en heure et ω en degrés.

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) \quad (IV.3)$$

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (IV.4)$$

IV.3.2.1 Cas particuliers

Les quantités relatives au lever et au coucher du soleil ($h=0$) sont marquées de l'indice inférieur «₀» et celles relatives au midi solaire (12 h TSV , $a=\omega=0$) de l'indice «_m».

On a donc :

➤ Hauteur à midi solaire $h_m = \sin^{-1} [\cos(\delta - \varphi)] \quad (IV.5)$

➤ Angle horaire au coucher $\omega_0 = \cos^{-1} [-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (IV.6)$

➤ Azimut au coucher $a_0 = \cos^{-1} [-\sin(\delta) / \cos(\varphi)] \quad (IV.7)$

➤ Durée de jour en (h) $ddj = 2 \omega_0 / 15 \quad (IV.8)$

Remarque : si $\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta) \geq 1$, le soleil ne se couche pas ($\omega_0 = a_0 = 180^\circ$).

Des diagrammes solaires peuvent également permettre une détermination rapide, en un lieu de latitude φ donnée, des valeurs de a et h pour chaque heure (solaire) de la journée et chaque mois de l'année.

Ces diagrammes solaires servent à établir la durée du jour selon les mois et l'ensoleillement quotidien moyen. Un autre usage, plus répandu, est de relever du diagramme des ombres du site d'installation de modules solaires afin de :

- vérifier que le site choisi est adapté car les obstacles ne feront pas d'ombre sur les modules.

- évaluer l'impact de l'ombre sur les modules solaires au cas où il n'est pas possible de les installer dans un endroit sans ombre tout au long de l'année.

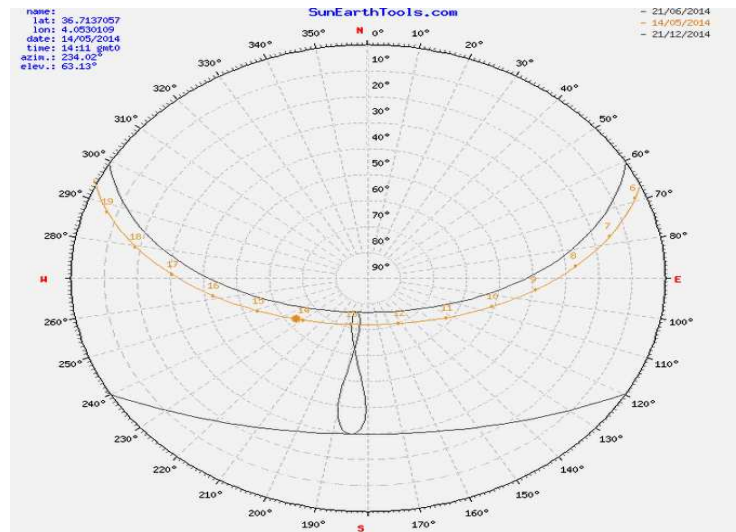


Figure IV.5 Diagramme solaire pour le site Tizi-Ouzou

IV.3.3 Modèle simplifié de l'éclairement :

L' éclairement incident pour une journée est donné par une expression mathématique qui s' écrit comme suit :

$$E = E_m \cdot \sin \frac{\pi(t-t_0)}{12} \quad (IV.9)$$

E_m : Eclairement maximal du site en (w/m^2) ; t_0 : temps de lever du soleil ; t : en heure.

IV.3.4 Rayonnement hors atmosphère

On détermine l'irradiation hors atmosphère, sans prise en compte du lieu d'étude de la saison et de la nébulosité du ciel, de nombreuses mesures météorologiques ont permis d'établir des formules empiriques exprimant l'irradiation au sol à partir d'irradiations hors atmosphère [13].

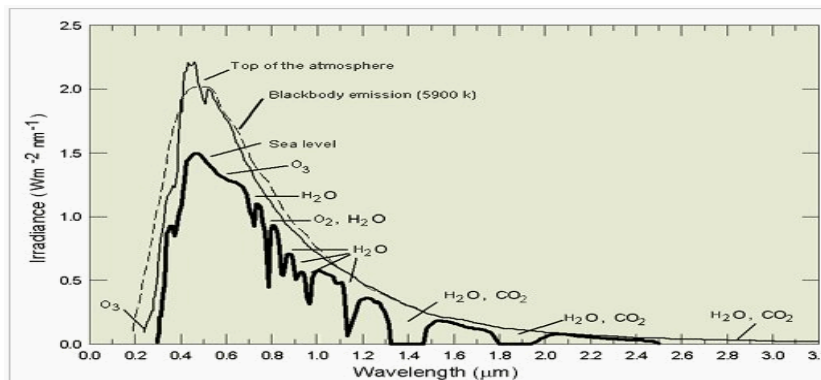


Figure IV.6 Spectre du rayonnement solaire

IV.3.5 Rayonnement solaire au sol :

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

- Le **rayonnement direct** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- Le **rayonnement diffus** est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Le **rayonnement global** est la somme du rayonnement direct et diffus.

Les mesures expérimentales de l'éclairement sont le plus souvent, comme on le verra pas la suite, obtenues pour des surfaces horizontales. Pour calculer à partir de ces mesures, l'éclairement sur une surface quelque soit son orientation, on introduit une quantité caractéristique appelée rapport d'éclairement ; compte tenu de ce que on vient de voir, on fait apparaître trois rapports d'éclairements en fonction du type d'éclairement étudié : direct, diffus, ou global [13].

Dans le cas de l'éclairement direct, on pose : $R_s = \frac{S^*(i,\gamma)}{S^*_h}$ (IV.10)

De même on pose pour l'éclairement diffus : $R_D = \frac{D^*(i)}{D^*_h}$ (IV.11)

Et, pour l'éclairement global : $R_G = \frac{G^*(i,\gamma)}{G^*_h}$ (IV.12)

- Nous avons la relation : $S^* = I^* \sin(h)$ (IV.13)

Ces définitions amènent aux résultats suivants :

$$R_s = \frac{\sin(i) \cdot \cos(a-\gamma)}{\tan(h)} + \cos(i) \quad (\text{IV.14})$$

$$R_D = \left(\frac{1+\cos(i)}{2} \right) + \left(\frac{1-\cos(i)}{2} \right) \cdot a^* \cdot \frac{G^*_h}{D^*_h} \quad (\text{IV.15})$$

$$R_G = \left(R_s - \frac{1+\cos(i)}{2} \right) \cdot \frac{S^*_h}{G^*_h} + \frac{1+\cos(i)}{2} + \left(\frac{1-\cos(i)}{2} \right) \cdot a^* \quad (\text{IV.16})$$

Remarque : si le calcul donne $R_s < 0$, alors on prend $R_s = 0$.

Dans la pratique, pour que les rapports d'éclairement soient les plus élevés possibles, on incline les panneaux PV d'un angle proche de latitude du lieu ($i \approx \varphi$). On verra cependant qu'il existe une plage d'inclinaison, autour de la position $i = \varphi$ suffisamment large pour permettre une installation aisée sur la surface existante (toiture, talus...).

Le tableau ci-dessous donne pour un ciel clair, c'est-à-dire sans nuage, les éclairements solaire I^* et G_h^* . Les conditions de troubles correspondent à la teneur de l'atmosphère en poussière et autres polluants. Un ciel très pur sera le plus souvent rencontré en montagne et un ciel trouble en agglomération. Ces expressions empiriques ont été obtenues par l'analyse de nombreuses mesures météorologiques réalisées par (*Perrin de Brichambaut*), dans lesquelles la hauteur h du soleil au dessus de l'horizon doit être exprimée en degrés [13].

Tableau IV.1 Expressions empiriques des éclairements solaires I^* et G_h^* [13].

Conditions de trouble	I^* [w/m ²]	G_h^* [w/m ²]
Ciel très pur	$1210 \exp\left(-\frac{1}{6 \sin(h+1)}\right)$	$1130(\sin h)^{1,15}$
Ciel moyennement trouble	$1230 \exp\left(-\frac{1}{3,8 \sin(h+1,6)}\right)$	$1080(\sin h)^{1,22}$
Ciel trouble	$1260 \exp\left(-\frac{1}{2,3 \sin(h+3)}\right)$	$995(\sin h)^{1,25}$

IV.4 Etudes du système photovoltaïque :

IV.4.1 Historique de l'énergie photovoltaïque :

Quelques dates marquantes dans l'histoire de l'énergie photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 %; Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

IV.4.2 Principe de la conversion d'énergie photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque, cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques. La tension générée par une cellule photovoltaïque peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule [15].

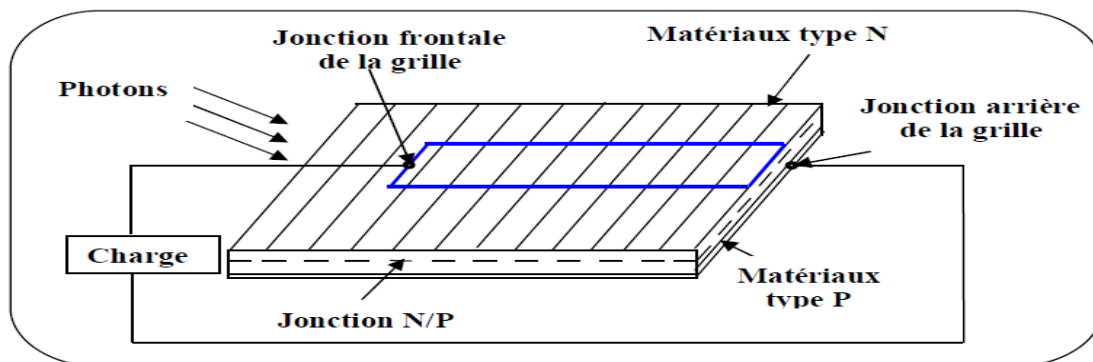


Figure IV.7 Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par PV.

Les cellules photovoltaïques au silicium cristallin, se composent d'un matériau semi-conducteur dont les parties supérieures et inférieures sont dopées différemment. Elles se distinguent par le nombre de charges négatives qu'elles possèdent. La première est dite « dopée de type N » (pour négatif), car elle renferme un surplus d'électrons par rapport au matériau non dopé, tout en restant neutre électriquement, et la seconde partie quant à elle « dopée de type P » (pour positif), car elle présente un déficit en électrons.

Lorsque les deux couches sont mises en contact, les électrons en excès de la partie N diffusent spontanément vers la région déficitaire. Les couches N et P deviennent alors respectivement positive et négative. Il se crée donc un champ électrique qui tend à repousser les électrons excités par les photons vers la couche N, et les trous vers la couche P, où des collecteurs se chargent de les récolter. On peut ainsi mesurer une différence de potentiel entre les deux bornes.

Pour un courant nul, la tension maximale d'une cellule photovoltaïque est d'environ 0.6 V, cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{oc} . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit I_{SC} (*intensité short circuit*) et dépend fortement du niveau d'éclairement.

IV.4.3 Technologies des cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semiconducteurs.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes:

- ❖ La première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou polycristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité est de 12 à 15 %.
- ❖ La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.
- ❖ La troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium (CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs), cette technologie est employée aux panneaux dites multicouches qui est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant (d'après Total énergie revue du 9 Juillet 2006).

Tableau IV.2 Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques [15]

Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaines d'application
	théorique	en labo.	disponible	
Silicium monocristallin	27	24.7	14-16	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de Gallium GaAs	29	27.5	18-20	systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIS	27.5	18.2	10-12	appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellurure de Cadmium CdTe	28.5	16	9-11	modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

IV.5 Différentes configurations des systèmes photovoltaïques [15] :

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants :

- un générateur photovoltaïque (GPV).
- un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation, de stockage et une source auxiliaire d'appoints.

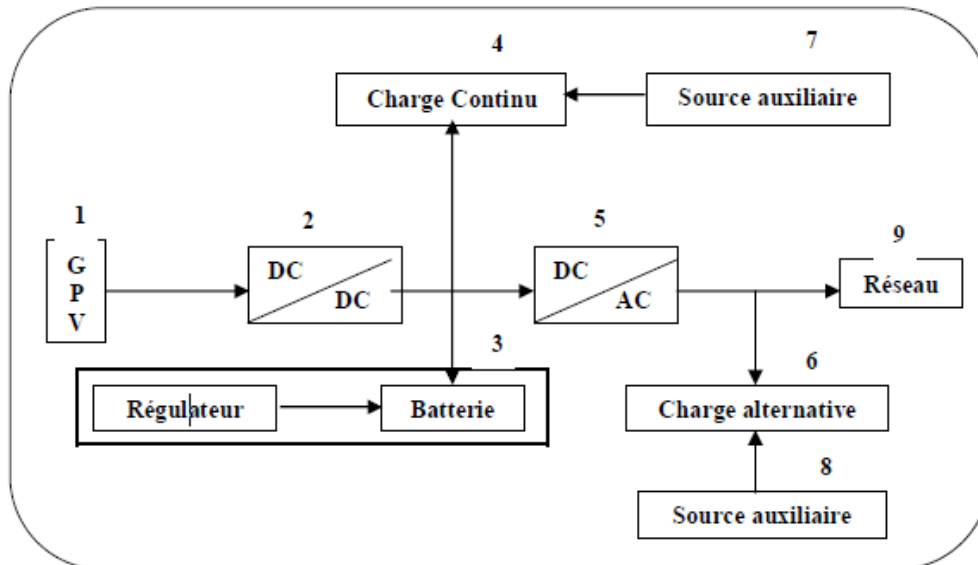


Figure IV.8 Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque

IV.5.1 Système autonome sans batterie :

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par les blocs (1) et (4) de la figure précédente. La charge de type continue est alimentée directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.

IV.5.2 Système autonome avec batterie :

Ces systèmes sont représentés par les blocs [(1), (3), (4)] dans le cas où la charge est de type continue, et les blocs [(1), (3), (5), (6)] si la charge est de type alternative. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, cette énergie peut être utilisée même en l'absence de rayonnement solaire.

IV.5.3 Systèmes fonctionnant à la présence du soleil

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permettent une adaptation entre le générateur et la charge continue [(1), (2), (4)], et si la charge est de type alternative, le convertisseur DC/AC est introduit [(1), (5), (6)].

IV.5.4 Systèmes avec appoint électrique :

Pour ces systèmes on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergie électriques (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées), ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu [(1),(2),(3),(4),(7),(9)] ou de type alternatifs [(1),(2),(3),(5),(6),(8),(9)]. Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie.

IV.5.5 Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque représente la source d'énergie électrique alimentant le moteur du compresseur. Il est constitué d'un ensemble de modules rangés sous forme de panneaux, les modules utilisés sont de type polycristallin (*BP 83*), dont les caractéristiques sont données dans l'annexe. La structure topologique du générateur est composée d'un nombre de modules séries N_S et d'un nombre de modules parallèles N_P , En fonction de la puissance désirée, les panneaux eux-mêmes peuvent être assemblés pour constituer le champ (générateur) photovoltaïque. Le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque est caractérisé par [15]:

$$I_{GPV} = N_P \times I \quad (IV.17)$$

$$V_{GPV} = N_S \times V \quad (IV.18)$$

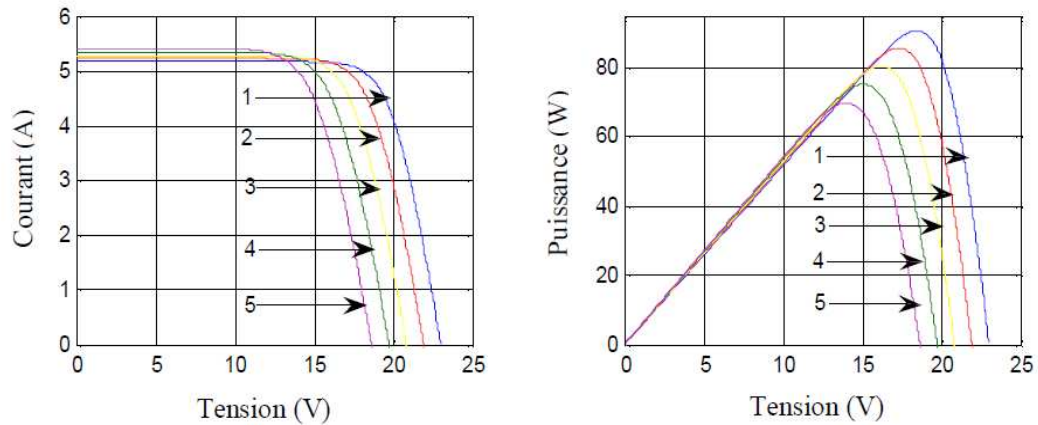
I_{GPV} est le courant et V_{GPV} est la tension du générateur photovoltaïque et N_P , N_S sont les nombres des modules en parallèle et en série.

IV.5.5.1 Influence de l'éclairement et la température :

Le courant est normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous de faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charge -le courant de saturation- sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement.

Le photocourant créé dans une cellule photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée.

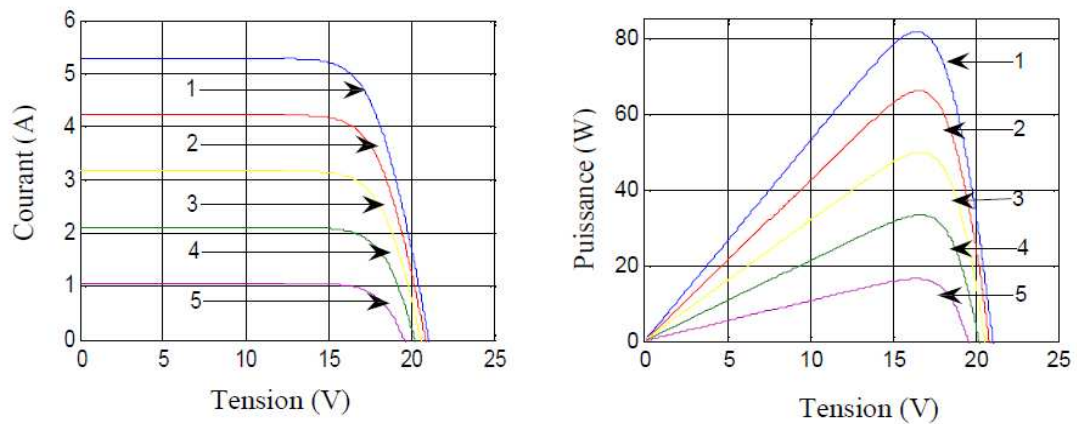
La tension à vide diminue avec la température, à l'inverse du courant de court-circuit. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du courant de court-circuit, et la puissance nominale fournie par une cellule va donc varier très légèrement avec la température de jonction (courbes obtenus expérimentalement)[15].



Légende : 1: 0 C°, 2: 15C°, 3: 30 C°, 4: 45 C°, 5 : 60°C

Figure IV.9 Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) à $E=1000\text{w/m}^2$ [15]

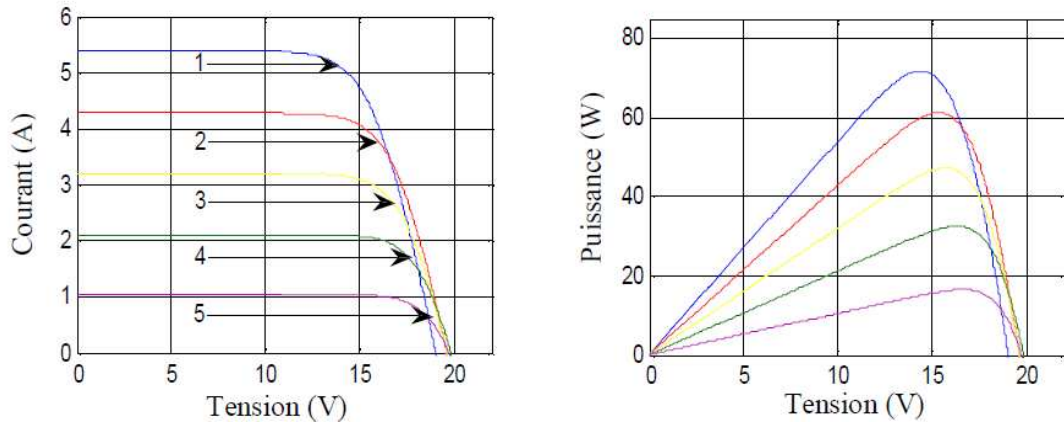
Par contre, lorsque nous avons maintenu une température constante à différents éclairagements (Figure IV.10), on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit (I_{sc}) est une fonction linéaire de l'éclairage et la tension du circuit ouvert (V_{oc}) est une fonction logarithmique [15].



Légende : 1 : 1000w/m², 2 : 800 w/m², 3 : 600 w/m², 4 : 400w/m², 5 : 200w/m².[15]

Figure IV.10 Influence de l'éclairage sur la caractéristique I(V) et P(V) à $T= 25\text{ C}^\circ$

La variation de la température et de l'éclairage en même temps, nous permet de conclure qu'il y a une petite variation de la tension du circuit-ouvert (V_{OC}). Par contre il y a une grande variation du courant I_{SC} comme le montre la figure (IV.11) [15].

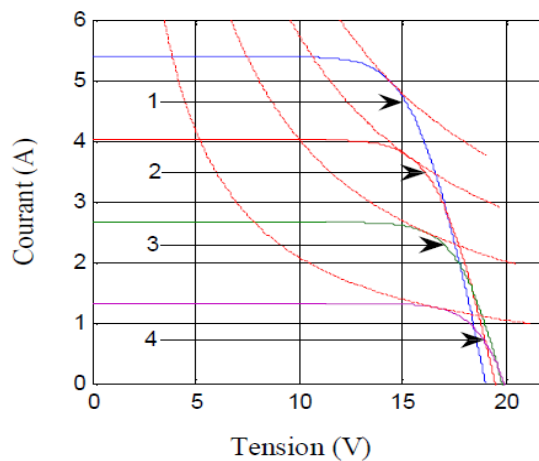


Légende : 1 :1000w/m², 55C°, 2 : 800w/m², 44C°, 3 :600w/m²,36 C°, 4 :400w/m²,32C°, 5 :200w/m² 25 C°.

Figure IV.11 Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I (V) [15]

IV.5.5.2 Recherche du point optimal de fonctionnement :

Cette caractéristique permet d'obtenir le point optimal de fonctionnement du modèle et de calculer la puissance maximale du module photovoltaïque.



Légende :1 :1000W/m², 55°C ; 2 :750W/m², 45 °C ; 3 :500W/m², 35 °C; 4 :250W/m², 25°C.

Figure IV.12Caractéristiques courant – tension et puissances optimales

Le rendement est le rapport de la puissance électrique optimale et la puissance des radiations incidentes [4].

$$\eta_{PV} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{E \cdot S_m} \text{ (IV.19)}$$

S_m et la surface du panneau photovoltaïque.

Le rendement du module photovoltaïque dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2), est de 14.22 %.

Le tableau suivant donne la valeur de la puissance nominale calculée en fonction du rayonnement ainsi que le rendement :

Tableau IV.3 Rendement du panneau photovoltaïque MSX60 [16]

Rayonnement [W/m ²]	Température [°C]	Puissance optimale [W]	Rendement (%)
1000	55	71.76	12.04
750	45	57.31	12.82
500	35	40.27	13.51
250	25	20.85	13.99

En s'aidant des valeurs du tableau ci-dessus et des caractéristiques électriques typiques données par le constructeur [15] pour des conditions normales correspondant à un rayonnement de 1000 W/m^2 , on déduit que le nombre de panneaux nécessaire à installer pour assurer une puissance de 113 W est de 2 ayant chacun une superficie de 0.558 m^2 .

Nous obtenons un rendement un peu supérieur à 10%, qui diminue avec l'intensité du rayonnement mais augmente avec la diminution de la température.

IV.6 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont :

IV.6.1 Avantages :

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité du système.
- Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.

- Ils ne consomment aucun combustible fossile.
- Une haute fiabilité qui rend leur utilisation dans les équipements spatiaux.
- Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Ils ont une longue durée de vie.
- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés,
- Ils conviennent pour des sites isolés.

IV.6.2 Inconvénients :

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend leur coût très élevé.
- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %,
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- L'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.
- Ils occupent des espaces importants pour produire des puissances importantes.

IV.6 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté les principales caractéristiques et technologiques des éléments constitutifs d'un générateur PV et nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension d'un générateur photovoltaïque ainsi nous avons bien montré l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement de la cellule, et on constate que la puissance ne dépend pas seulement de la température mais dépend aussi de l'éclairement. Le nombre de panneaux à installer pour assurer le fonctionnement du prototype réalisé est de deux présentant chacun une superficie de 0.558 m^2 .

Conclusion générale

Ce mémoire nous a permis de concevoir un prototype d'un réfrigérateur portable qui fonctionne avec une tension d'alimentation de 12V continue produite par des panneaux photovoltaïques; Ce prototype a été testé au niveau de laboratoire "Laboratoire d'Application des Techniques Avancées de génie électrique" LATAGE de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, en conditions climatiques réelles. Nous avons pu constater le bon fonctionnement du prototype et aucun dysfonctionnement n'a été observé. La miniaturisation de tel réfrigérateur s'est montrée tout à fait réalisable.

La technique utilisé dans ce prototype, essentiellement dans la partie compresseur, permet d'avoir plusieurs tendances futures d'améliorer notre machine comme la réduction de sa consommation en électricité, le bruit et la puissance frigorifique produite.

La fabrication de tel machine produisant du froid fonctionnant à une tension de 12volt peut tenir des applications diverses dans plusieurs domaines comme (la médecine ; consiste la transportation des vaccins et médicaments, besoin du froid dans des sites isolé ou il ya absence d'électricité de réseau et dans le domaine de la climatisation et autres.

1) Caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé :

Typical Electrical Characteristics¹

	<u>MSX-64</u>	<u>MSX-60</u>
Maximum power (P _{max})	64W	60W
Voltage @ P _{max} (V _{mp})	17.5V	17.1V
Current @ P _{max} (I _{mp})	3.66A	3.5A
Guaranteed minimum P _{max}	62W	58W
Short-circuit current (I _{sc})	4.0A	3.8A
Open-circuit voltage (V _{oc})	21.3V	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage-(80±10)mV/°C.....	
Temperature coefficient of short-circuit current(0.065±0.015)%/°C..	
Temperature coefficient of power-(0.5±0.05)%/°C...	
NOCT ² 47±2°C	

2) Caractéristique du module photovoltaïque à T=25°C et E=1000W/m²

Température	<i>T</i>	25	°C
Tension de circuit ouvert	<i>V_{oc}</i>	21.2	V
Courant de court circuit	<i>I_{sc}</i>	5.27	A
Tension optimale	<i>V_{mp}</i>	17.23	V
Courant optimale	<i>I_{mp}</i>	4.85	A
Puissance de crête	<i>P_c</i>	83	W
Surface	<i>S_m</i>	0.588	m ²

Références bibliographiques :

- [1] N. Pavloff, Résumé du cours de thermodynamique, Université d'Orsay, Mars 2006.
- [2] Y. A. Cengel, M. A. Boles, Thermodynamics, An Engineering approach, 3ème Edition, 2001
- [3] M. Frère, Réfrigération solaire, Faculté polytechnique de Mons, 2005.
- [4] G. J. Van Wylen, R. E. Sonntag, P. Desrochers, Thermodynamique appliqué, Editions du renouveau pédagogique, 1981.
- [5] Generalized Thermodynamics: *Thermodynamics of Irreversible Processes and Generalized Hydrodynamics*.
- [6] <http://3156.eg.all.biz/fr/les-compresseurs-gg1001582>
- [7] Transferts Thermiques - Rappels De Cours Et Applications, Dut-Bts, Ecoles D'ingénieurs
- [10] Composants-frigorifiques, existe en pdf publier par danfoss.
- [11] Mesures réel présent au moment d'usinage du system HTC 12v
- [12] livre thermique solaire ; thermiquesolaire « Yves JANNOT »
- [13] Energie solaire calcul et optimisation, Jacques Bernard .
- [14] B.Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de Cours », énergie solaire photovoltaïque Ellipses 1993.
- [15] MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules www.solarex.com
- [16] Résultat obtenus au laboratoire « LATAGE» Laboratoire d'applications des Techniques Avancés Génie Electrique.